

博士学位論文

電気二重層キャパシタを用いた
モータアシスト自動MTの研究

Research on Motor-Assisted AMT with Super Capacitor

藤井 毅

指導教員

堀 洋一 教授

東京大学大学院

工学系研究科 電気工学専攻

2009年6月

内容梗概

本論文は、「電気二重層キャパシタを用いたモータアシスト自動 MT の研究」と題し、自動マニュアルトランスミッション(以下 AMT)と呼ばれる変速機と、大容量キャパシタ駆動により駆動されるモータの組み合わせによるハイブリッド車両を提案し、その成立性と制御方法に対して検討を行い、実験的な検証によってそれを実証した結果をまとめたものである。

主に車重が 500kg を下回るような軽車両のエネルギー効率改善法のひとつとして、上記のハイブリッド車両を提案し、その成立性と制御方法に対して検討を行う。

ハイブリッドシステムの設計問題を、車両重量に着目したモータ・エンジンの最適配分問題として捉え、エンジンやモータによる重量増を加味したエネルギー分析を行う。その結果、車両の重量に応じて、採用するにふさわしいハイブリッドシステムが異なることを理論的に提示する。

実際にモータアシスト AMT を実現するためには、車両の駆動力制御と電気二重層キャパシタの充放電を同時に行うことが必要不可欠である。その方法としてエンジントルクオブザーバに基づくコントローラを提案し、追加センサを用いずにモータアシスト AMT を実現する手法の設計を行う。また、その制御が変速中の加速度変動抑制だけでなく、通常走行中の車体の制振にも効果があるということを提示する。

実車両を試作するにあたり、Matlab/Simulink を用いたシミュレーションプログラムを作成し、提案した M-AMT と制御手法で車両として成立するか検討を行う。現在入手可能なキャパシタやモータの組み合わせでモータアシスト AMT が十分成立可能であることを示した。

インドで実際に走行しているオート 3 輪車をベースに M-AMT を搭載した実験車両を製作し、走行試験を行う。電気二重層キャパシタと M-AMT の組み合わせで変速中の加速度変動を抑制することができ、トルク振動の抑制にも効果的であることを示すことを持って結論とする。

要旨

近年の地球環境の保護に対する関心の高まりや石油価格の高騰をうけ、自動車の燃費性能向上や排気性能向上に対する市場の要求が高まり、電気自動車の効率の良さや排気のクリーンさが見直されるようになってきた。しかしながら、2009年時点においては、エネルギーストレージの容量不足が主因となり、未だ電気自動車が一般的に普及するには至っていない。そこで、容量不足を補う現実的な解として、ハイブリッド自動車の普及が進んでいる。

現在広く普及しているハイブリッド車両は、ニッケル水素電池などの二次電池を電源として、エンジンのトルクとモータのトルクを協調して出力することによって車体を駆動する「パラレルハイブリッド」と呼ばれるシステムを採用しているものがその大半を占める。この方式のハイブリッドシステムでは、エンジンの駆動力とモータの駆動力を同時に利用することができるため、シリーズハイブリッドなどのハイブリッドシステムと比較して、エンジンとモータの重量を小さくまとめることが可能である。そのため、車体重量にして1000kg~2500kg程度の車両のエネルギー効率向上の手段として用いられている。

一方で、車体重量が小さい軽車両に目を向けると、ハイブリッドシステムを採用している例は少ない。その理由のひとつとしてあげられるのが、車体の軽い車両においてはモータやエネルギーストレージの重量増に見合うエネルギー効率向上性能が得られないことである。そもそもこのような軽車両はあまり走行距離を必要とせず、走行エネルギー自体も少量で済むため、純電気自動車でも十分な走行性能を満たすことが可能であり、ハイブリッドシステムは不要であるという意見もある。しかしながら、たとえば東南アジアなどにおいて見られている乗り合いオート3輪車のように、長距離を走行する軽車両も世界的にはニーズが多く、このクラスの車両のエネルギー効率向上が大きな課題となっている。

本研究では、AMTと呼ばれる自動変速機と、大容量キャパシタ駆動モータの組み合わせによるハイブリッド車両を提案し、その成立性と制御方法に対して検討を行う。近年の材料技術やパワーエレクトロニクス技術の向上により、蓄電要素の一種であるキャパシタの大容量化が著しく進展し、自動車の駆動電源として用いることができるレベルにまで達してきた。キャパシタは従来の化学電池と比較して、単位重量あたりに蓄えられるエネルギーの総量は小さいものの、出力密度が非常に大きく瞬時に大エネルギーを放出することが可能である。そのためハイブリッド自動車の駆動電源として大容量キャパシタを用いることで、内燃機関とキャパシタの互いの特徴を相補し、より性能の高いハイブリッド車両を成立させることができるのではないかと期待されている。

まず第2章でモータアシスト AMT の提案を行い、その特徴と従来型 HEV との差異について述べる。モータアシスト AMT は変速機の出力軸後端に駆動力をアシストするためのモータを取り付けたことを特色とする自動変速機の一つであり、従来型の M/T をベースとし

て部品を追加するだけで自動化することができると同時に減速時のエネルギー回生も可能であるという特徴を持つ。モータは変速機の後端に取り付けられているため、上流のトランスミッションが変速中等の理由でエンジントルクが車軸に伝わっていない間に限り、そのトルクを補償するようにモータがトルクをアシストするものである。このような HEV システムにおいては、モータが連続的に大トルクを負担する必要がないため、モータやエネルギーストレージ等電気駆動系の小型化をすることが可能である。このシステムや他の一般的な HEV システムを含め、現在の技術動向について詳述する。

第 3 章では提案するモータアシスト AMT に適したエネルギーストレージに関する考察を行う。鉛電池やニッケル水素電池、リチウムイオン電池、そして電気二重層キャパシタなど近年著しく進化している自動車用エネルギーストレージについて、それぞれの特徴や性能について調査し、そのまとめを行う。

第 4 章では設計問題としてエンジンとモータ、エネルギーストレージの重量配分について取り扱う。ハイブリッド車両の設計において、モータとエンジンの重量配分とその駆動方法の選択は重要な項目である。そもそもハイブリッド車両はエンジンとモータという同じ働き出力要素を搭載する必要があるため、設計次第では重量の増加に伴い効率が悪化してしまう可能性すら孕んでいる。そこで、この章ではエンジンやモータ、エネルギーストレージの重量を考慮に入れた車両のエネルギー効率に関する考察を行う。まず一般的な走行を解析的に評価するために、発車から停車までの速度パターンを最高速度、加速度、巡航割合という 3 種のパラメータを用いてモデル化する。次にモータを搭載しない従来型車両や今日一般的に走行している従来型 HEV 車、そして提案する M-AMT 車の 3 者について、モータやエネルギーストレージによる重量増加を加味した燃費解析を行い、最適なエネルギー効率が得られる重量配分を解析的に求める。さらに、車体重量を変数としてみた場合にその最高燃費自体がどのように変化するかを提示し、電気二重層キャパシタとモータアシスト式 AMT という組み合わせが軽車両のエネルギー効率改善に有効であるということを実論的に裏づける。

第 5 章では具体的なトルクと充放電の制御法について検討を行う。ここではおおきく分けて二つの提案を行う。まずエネルギーストレージに蓄えられるエネルギーは、低車速時には多く、高車速時には少なくあるべきである。これを実現するために、キャパシタの端子間電圧を元にエネルギーストレージの残存エネルギーを常時観測し、それを車速により決まる目標電圧に追従させる制御方法を提案する。また、AMT の変速装置として使用されるクラッチという機械要素は本質的に磨耗要素であり、ストロークセンサを利用した正確な推定やクラッチの遮断 / 解放判定は難しい。同時に、エンジントルクも外気温度や気圧などの条件によりその大きさや応答速度が変化するため、トルクゲージなどの追加センサを用いなければ正確なトルクを得ることは難しい。そこで、これらのエンジンから伝達されるトルクを外乱トルクとして看做す「エンジントルクオブザーバ」に基づくモータコントローラを提案する。モータのトルク制御を正確に行うことで、追加センサを用いずに提案

するモータアシスト AMT を実現する手法の設計を行う。

第6章ではモータアシスト AMT の成立性に関するシミュレーションを行う。プログラミングツールには Matlab/Simulink を用い、Simulink のモデル上に車体やエンジン・モータ、エネルギーストレージ、路面勾配などのプラントを模したモデルと5章で提案した制御を組み込んだコントローラを模したモデルを配置し、車両のダイナミクスやモータ電流などを統一的に数値演算するシミュレーションプログラムを作成する。プラントのシミュレーションの結果、現状の材料・技術を用いることで、電気二重層キャパシタによるモータアシスト AMT が製作可能であることを確かめる。さらに副産物として、加速応答の向上や制振性の向上など、変速にかかわらない走行性能についての効果についても検討を行う。

第7章では提案するモータアシスト AMT の効果を検証するため、実車両を用いた実験を行う。種車両としてインド Lovson 社製の三輪車 RICKY を輸入し、電気二重層キャパシタ駆動のモータを車軸に取り付け、モータアシスト AMT の実験車を製作する。本章ではその構成について述べるとともに、実験結果について検討を行う。実験車を実際に走行させ、電気二重層キャパシタによるモータアシスト AMT で、変速によるトルク抜けを抑制し、連続的な加速が実現できることを確かめる。

本研究により、500kg を切るような軽車両のエネルギー効率改善に電気二重層キャパシタとモータアシスト式 AMT という組み合わせが有効であるということを示した。エンジントルクオブザーバを用いたモータトルク制御を行うことにより、ストロークセンサやトルクゲージなしでもドライバ要求トルクに追従した連続的な加減速とエネルギー充放電の管理が同時に行えることを示した。さらに、その制御がトルク振動の抑制にも効果的であることを示した。実験車を製作し、その効果を確認することができた。

知見

- ハイブリッドシステムの設計問題を、車両重量に着目したモータ・エンジンの最適配分問題として捉え、エンジンやモータによる重量増を加味した燃費解析を行った。その結果、車両の重量に応じて、採用するにふさわしいハイブリッドシステムが異なることを理論的に提示することができた。
- 提案するモータアシスト AMT は 500kg を下回るような軽車両の燃費向上に効果的であり、モータの許容される瞬間最大出力が大きく取れば、さらに広範囲の車両に適用可能であるということを示した。
- 車両の駆動力制御と電気二重層キャパシタの充放電を同時に行う方法として、エンジントルクオブザーバに基づくコントローラを提案し、トルクゲージなどの計測装置を用いずにモータアシスト AMT を実現する手法を提案した。また、その制御が変速中の加速度変動抑制だけでなく、通常走行中の車体の制振や加速応答の向上にも効果があるということを示した。
- PC 上のシミュレーションと実車両を用いた走行試験を行い、その成立性を評価した。

目次

1. 序論	- 1-
2. モータアシスト AMT の提案	
2.1 シリーズハイブリッドシステム	- 5-
2.2 パラレルハイブリッドシステム	- 7-
2.3 モータアシスト AMT	- 9-
3. エネルギーストレージデバイスの選定	
3.1 ニッケル水素電池	-12-
3.2 リチウムイオン電池	-13-
3.3 電気二重層キャパシタ	-14-
3.4 M-AMT に適したエネルギーストレージデバイスの選定	-15-
4. HEV 車両のエネルギー効率に関する考察	
4.1 実車両の重量分析	-18-
4.2 定められたモードにおけるエネルギー効率の調査とその分析	-23-
4.3 設計制約に関する考察	-26-
4.4 エネルギー効率計算	-31-
4.5 従来 HEV と M-AMT のエネルギー効率比較	-35-
4.6 まとめ	-38-
5. トルクと充放電の制御法の検討	
5.1 要求トルクの計算	-40-
5.2 エンジン・ブレーキの制御	-41-
5.3 エンジントルクオブザーバによるモータの制御	-42-
6. シミュレーション試験	
6.1 車両モデル	-45-
6.2 電気回路モデル	-46-
6.3 機械要素モデル	-47-
6.4 シミュレーション結果	-48-

7. 実車試験	
7.1 実験車両の構成	-54-
7.2 実験条件	-57-
7.3 実験結果	-58-
8. 結論	-60-
A. 付録1 シミュレーションプログラム概要	-61-
B. 付録2 実験車両概要	-80-
参考文献	-93-
発表文献	-95-

1. 序論

近年の地球環境の保護に対する関心の高まりや石油価格の高騰をうけ、自動車の燃費性能向上や排気性能向上に対する市場の要求が高まっている。そこで、石油やガスなどをエネルギー源とする内燃機関駆動の自動車に代わり、燃費効率が高く排気のクリーンな電気自動車が見直されるようになってきている。例えば 2009 年のトピックとしては、たとえば日本では、三菱自動車から i-MiEV という小型車クラスの量産車が市場に投入された⁽¹⁾。お金さえ払えば高速道路を走行可能なレベルの電気自動車を、一般のユーザが手に入れることができるところまで到達しつつある。

しかしながら、現時点においては、未だ電気自動車が道路の主役を担うには至っていない。その理由のひとつがエネルギーストレージを担う電池の容量不足及び価格、また充電設備等が車両ほど普及していないことなど航続距離に関する問題である。特に電池と化石燃料のエネルギー密度の差に起因する航続距離の差は大きく、先の i-MiEV の例でも 160km⁽¹⁾程度であり、従来のガソリン駆動の小型車のレベルには到達していない。

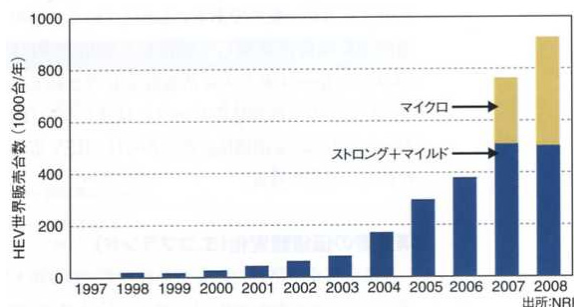


図 1.1 世界におけるハイブリッド車両販売台数

こうした社会背景の中で、現実的な解決策の一つとして、ハイブリッド自動車の普及が進んでいる⁽²⁾。ハイブリッド車両は内燃機関と電気モータなど、複数の出力要素を 1 台の車両に搭載した車両のことであり、小型車からバストラックなどの大型車に至るまで、さまざまなバリエーションの車両が開発・生産されている⁽³⁾⁽⁴⁾。エネルギー密度が高く、コンパクトで長距離走行に適する出力要素である内燃機関と、マイナストルク駆動時にそのエネルギーをエネルギーストレージに回生することができ、効率の高い駆動要素である電気モータの両方を一台の車両に搭載することで、距離と効率の両立を図ることができる。しかしながら複数の出力要素を搭載するため、従来の車両に比べ重量やコストの増加を招き、単純にシステム全体の設計に考察を要する。

現在広く普及しているハイブリッド車両は、ニッケル水素電池などの二次電池を電源として、エンジンのトルクとモータのトルクを協調して出力することによって車体を駆動する「パラレルハイブリッド」と呼ばれるシステムを採用しているものがその大半を占める。この方式のハイブリッドシステムでは、エンジンの出力とモータの出力を駆動力として同時に利用することができるため、他のシリーズハイブリッドなどのハイブリッドシステムと比較して、車輻に搭載するエンジンとモータの重量を小さくまとめることが可能である。そのため、重量増加の影響を受けやすい、車体重量にして 1000kg ~ 2500kg 程度の車両のエネルギー効率向上の手段として用いられている。

一方それに満たない重量であるような軽自動車や自動二輪車などに対しては、そもそも大型車に比較してエネルギー効率に優れており、ハイブリッド化してもコストや性能の面でバランスが取れないため、ハイブリッドシステムを採用するケースはまれである。また軽車両は、シティユースなど一回の乗車における走行距離が短い走行を主として利用されるケースが多く、航続距離に対する期待が小さい。そのため純電気自動車でもドライバの要求を満たす車輻を設計可能であると考えられ、実際にそのような公道走行可能な小型電気車輻も製品化されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

しかし世界に目を向けてみると、小型かつ安価でありながらも 1 日の走行距離が長い乗用軽車輻に対する需要も存在する。例えばインドでよく見られる 3 輪タクシーの場合では、最高速度はせいぜい 30km/h 程度であるものの、1 日平均で 40km~60km、多いときには 200km ほどの走行をこなす⁽⁷⁾。2000 年時点で、このようなエンジン駆動の軽車両が 2 輪車で 1800 万台、3 輪車で 150 万台存在している。車両の燃料消費量を 25km/l と仮定すると、1 台あたりおよそ 5[kg/日]の CO₂ を放出するという計算になる。これを年あたりに直すと、合計 36 万トンにも達する。これらの軽車両のエネルギー消費効率を 40% 向上することができれば、年間 13 万トンの CO₂ 削減効果が期待される。

本論文では、AMT と呼ばれる自動変速機とキャパシタの組み合わせによるハイブリッドシステムを提案し、その成立性と制御方法に対して検討を行う。近年の材料技術やパワーエレクトロニクス技術の向上により、蓄電要素の一種であるキャパシタの大容量化が著しく進展し、自動車の駆動電源として用いることができるレベルにまで達してきた。キャパシタは従来の化学電池と比較して、単位重量あたりに蓄えられるエネルギーの総量は小さいものの、出力密度が非常に大きく瞬時に大エネルギーを放出することが可能である。そのためハイブリッド自動車の駆動電源として大容量キャパシタを用いることで、内燃機関とキャパシタの互いの特徴を相補し、より性能の高いハイブリッド車両を成立させることができるのではないかと期待されている。

まず第 2 章でモータアシスト AMT の提案を行い、その特徴と従来型 HEV との差異について述べる。モータアシスト AMT は変速機の出力軸後端に駆動力をアシストするためのモータを取り付けたことを特色とする自動変速機の一つであり、従来型の M/T をベースと

して部品を追加するだけで自動化することができると同時に減速時のエネルギー回生も可能であるという特徴を持つ。モータは変速機の後端に取り付けられているため、上流のトランスミッションが変速中等の理由でエンジントルクが車軸に伝わっていない間に限り、そのトルクを補償するようにモータがトルクをアシストするものである。このような HEV システムにおいては、モータが連続的に大トルクを負担する必要がないため、モータやエネルギーストレージ等電気駆動系の小型化をすることが可能である。このシステムや他の一般的な HEV システムを含め、現在の技術動向について詳述する。

第 3 章では提案するモータアシスト AMT に適したエネルギーストレージに関する考察を行う。鉛電池やニッケル水素電池、リチウムイオン電池、そして電気二重層キャパシタなど近年著しく進化している自動車用エネルギーストレージについて、それぞれの特徴や性能について調査し、そのまとめを行う。

第 4 章では設計問題としてエンジンとモータ、エネルギーストレージの重量配分について取り扱う。ハイブリッド車両の設計において、モータとエンジンの重量配分とその駆動方法の選択は重要な項目である。そもそもハイブリッド車両はエンジンとモータという同じ働きの出力要素を搭載する必要があるため、設計次第では重量の増加に伴い効率が悪化してしまう可能性すら孕んでいる。そこで、この章ではエンジンやモータ、エネルギーストレージの重量を考慮に入れた車両のエネルギー効率に関する考察を行う。まず一般走行の速度パターンを 3 種のパラメータを用いてモデル化し、非 HEV 車や従来型 HEV 車、そして提案する M-AMT 車の 3 者について、最適なエネルギー効率が得られる重量配分を解析的に求める。さらに、車体重量を変数としてみた場合にその最高エネルギー効率自体が車体重量によりどのように変化するかを示し、電気二重層キャパシタとモータアシスト式 AMT という組み合わせが軽車両のエネルギー効率改善に有効であるということを理論的に裏づける。

第 5 章では具体的なトルクと充放電の制御法について検討を行う。ここではおおきく分けて二つの提案を行う。まずエネルギーストレージに蓄えられるエネルギーは、低車速時には多く、高車速時には少なくあるべきである。これを実現するために、キャパシタの端子間電圧を元にエネルギーストレージの残存エネルギーを常時観測し、それを車速により決まる目標電圧に追従させる制御方法を提案する。またセンサを利用したエンジントルクの正確な推定やクラッチの遮断 / 解放判定は難しく、正確性も低い。そこで、これらを外乱トルクとして看做す「エンジントルクオブザーバ」に基づくモータコントローラを提案する。モータの出力制御を正確に行うことで、追加センサを用いずにモータアシスト AMT を実現する手法の設計を行う。

第 6 章ではモータアシスト AMT の成立性に関するシミュレーションを行う。上記の提案を実現することが可能かどうかを考察するための数値シミュレーションを行う。プログラミングツールには Matlab/Simulink を用い、Simulink のモデル上に車体やエンジン・モータ、エネルギーストレージ、路面勾配などのプラントを模したモデルと 5 章で提案した制

御を組み込んだコントローラを模したモデルを配置し、車速や電流などのダイナミクスを数値演算するシミュレーションプログラムを作成する。プラントのモデルには先述の軽3輪車の例としてインド Lovson 社製の三輪車 RICKY の諸元を採用した。シミュレーションの結果、現状の材料・技術を用いることで、電気二重層キャパシタによるモータアシスト AMT が成立することが確かめる。また副産物として、加速応答の向上や制振性の向上にも効果が期待されることも確認する。

第7章では提案するモータアシスト AMT の効果を検証するため、実車両を用いた実験を行う。実際にインド Lovson 社製の三輪車 RICKY を輸入し、改造して実験車を製作した。本章ではその構成について述べるとともに実験結果について検討を行う。実験車を実際に運転し、電気二重層キャパシタによるモータアシスト AMT で滑らかな加速が実現できることを検証する。

2. モータアシスト AMT の提案

一言でハイブリッドシステムといっても、シリーズハイブリッドシステムやパラレルハイブリッドシステムなど、さまざまな種類のシステムが存在する。その違いによって搭載するモータやエンジンに求められるパワーやトルクは大きく異なり、対象となる車両スケールも変わってくる。そこで本章ではそれらの仕組みについて述べ、提案するモータアシスト AMT (以下 M-AMT) との差異を詳述する。

2.1 シリーズハイブリッドシステム

シリーズハイブリッドシステムは、エンジンの出力の全てを車上の発電機を用いて電力に変換し、その電力を用いて駆動用のモータを駆動して車体を駆動するシステムである。エンジンより出力されたエネルギーや車体減速時に駆動モータから得られる回生エネルギーは車上に設置された二次電池等のエネルギーストレージデバイスに備蓄される。代表的な構成例を図 2.1 に示す。

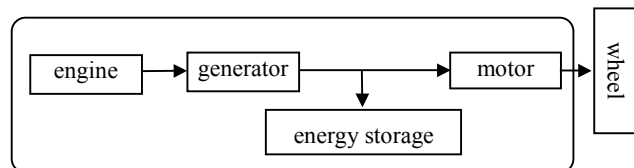


図 2.1 シリーズハイブリッドシステム構成図

本システムの場合、エンジンが車軸と完全に独立に回転することができるので、車両速度によらず任意の回転速度で出力を取り出すことが可能である。エンジンの燃料効率は回転速度に依存して変化することが知られており、本システムであれば常に最適な回転速度を選択して運転することが可能である。

一定加速度で走行する場合の走行パターンの模式図を図 2.2 に示す。原則的にモータが駆動力の全てを負担するので、加速度が一定ならモータのトルクは一定である。一方エンジンについては、エネルギーストレージに十分な電気エネルギーが蓄積されていれば、図 2.2 に示すようにエンジンを停止したまま走行することが可能である。シリーズハイブリッドシステムは、先述の最適回転速度維持による燃費効果も大きいですが、このようなエンジン停止による燃料消費削減効果も大きい。また、トランスミッションを用いずに前後進を行うこともできるという副次的な効果もある⁽⁸⁾。

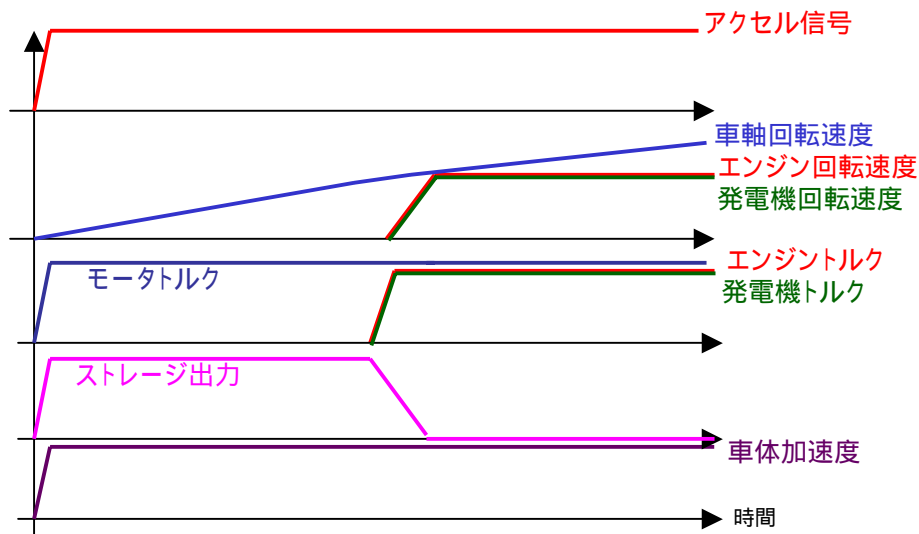


図 2.2 シリーズハイブリッドシステムの走行パターン模式図

しかしながら、モータが車両駆動の全負荷を担うため、強力なモータや大容量のエネルギーストレージが必要となる。そのため、トラックや鉄道車両など、比較的車体の大きい車両に適用されることが多い。

図 2.3 にシリーズハイブリッドシステムを鉄道車両に応用した例を示す。鉄道車両に対する応用は、単に非電化区間の燃費向上に寄与する電車の装備をそのまま流用することが可能であることから相性が良く、実際に JR 東日本で製作された試作車両は営業走行を行い、非電化区間の燃料効率向上に貢献するという結果が得られている(図 2.3、図 2.4)⁽⁹⁾。



図 2.3 シリーズハイブリッドシステム搭載車両の例

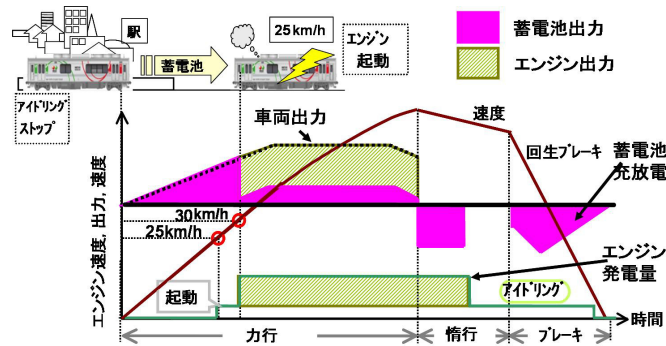


図 2.4 シリーズハイブリッドシステム出力配分例

2.2 パラレルハイブリッドシステム

パラレルハイブリッドシステムは、エンジンの出力を直接車両の駆動に用いると同時に、トルク分割機構を用いてエネルギーストレージに蓄えられた電力によるモータの出力も駆動力として用いるシステムである。その電力を用いて駆動用のモータを駆動して車体を駆動するシステムである。エンジンより出力された余剰エネルギーや車体減速時に駆動モータから得られる回生エネルギーは車上に設置されたエネルギーストレージデバイスに備蓄される。代表的な構成例を図 2.5 に示す。

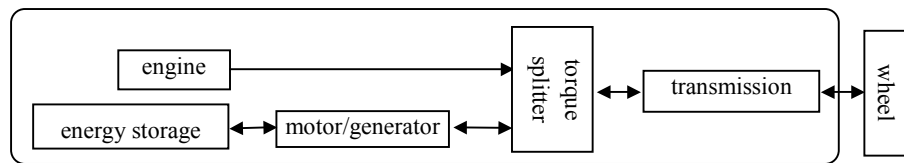


図 2.5 パラレルハイブリッドシステム構成図

本システムの場合、エンジンとモータが共同で駆動力を発生するため、両者の出力のエンジンやモータをコンパクトに収めることが可能である。モータユニットによる重量増加を抑えられることから、乗用車に適しており、市販車として販売されているハイブリッド車両の多くが採用している⁽¹⁰⁾。

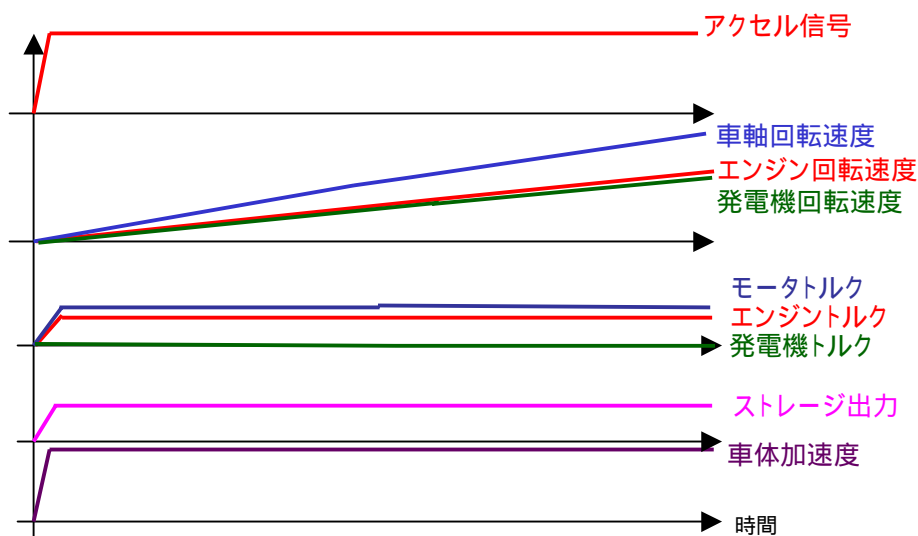


図 2.6 シリーズハイブリッドシステムの走行パターン模式図

一定加速度で走行する場合の走行パターンの模式図を図 2.6 に示す。原則的にモータとエンジンが駆動力を分担するので、加速度が一定ならモータによる出力とエンジンによる出力の和が一定である。しかしながら、このシステムではエンジンの回転軸は車両の回転軸と直接トルクのやり取りをするため、何らかの形で速度を変換する装置、すなわち「変速機」を介さなければ走行できない。エンジンの回転速度は車速に比例した「変速比」にしたがって車速とともに増加する。シリーズハイブリッドシステムのようにエンジンの回転速度を一定に保ち、常に燃料効率の良い領域で走行させることも不可能ではないが、そのためにはトランスミッションに無段変速機(CVT)を使い、変速比を連続的に切り替える等の工夫が必要である。実例として、トヨタ自動車プリウスのエネルギー授受パターンを図 2.7 にあげる。プリウスの場合は遊星歯車を用いたトルク分割機構を変速機として用いることで、エンジン回転速度を一定にしながらモータと協調して駆動を行っている。

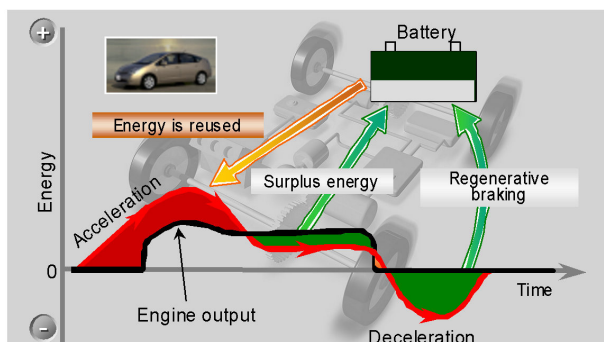


図 2.7 パラレルハイブリッドシステムのエネルギー管理

2.3 モータアシスト AMT

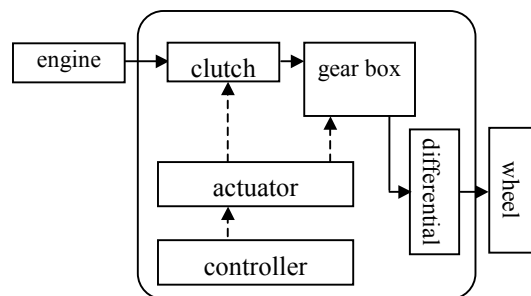


図 2.8 AMT 構成図

モータアシスト AMT の前提として自動マニュアルトランスミッション(以下 AMT)について説明する。AMT とは、有段 AT や CVT といった自動変速機の一つである。従来より存在するマニュアル式トランスミッションに、モータやソレノイドなどのアクチュエータを付加することでシフト機構やクラッチ機構を自動化した簡便な自動変速機である。その構造を図 2.8 に示す。機構が単純かつ摩擦要素が少ないため、流体式トルクコンバータを使用する通常の自動変速機と比較して効率に優れ、また安価に製造可能な自動変速機であるとして、従来より注目を集めていた。

しかしながらこの AMT は、構造的に変速中にクラッチを遮断してしまうとその間駆動力の抜けが発生するという本質的課題を抱えるため、その間ドライバーがアクセルを踏んでも加速することができず、従来の自動変速機に慣れているドライバーには強い違和感を与えてしまうという欠点を持つ。そのことが災いして、ロスが少ない変速機としては知られていながら、今まであまり普及してこなかった。

これを解決するためのひとつの手段として、ツインクラッチ式 AMT という構造が提案され、一部の市販車両に投入されている。これは偶数段のクラッチと奇数段のクラッチを 2 枚使用して変速を行うという AMT である。この変速機の場合、変速中も両方のクラッチを用いてトルクを伝達することができるので、変速中のトルク抜けはほとんど解消できるものの、1 3、2 4 のような奇数段同士・偶数段同士の掛けかえを行うことができず、また変速をしていない間は片方のクラッチを常時開放しておかなければならないため、その分抵抗が大きくなる。さらに構造が複雑化するため AMT 本来の良さがスポイルされてしまうため、一部のスポーツ車両にしか用いられていない。

M-AMT はこうした AMT の欠点を改善することを目的としたトランスミッションのひとつである。その構成を図 2.9 に示す。エンジンのトルクが変速機構により遮断されている間も、ギアボックス後端に取り付けられたモータが単独で出力軸を駆動することにより、変速前後で連続した加減速を行うことができる。同時に、減速時のエネルギー回収もモータを介して行うことが可能である。

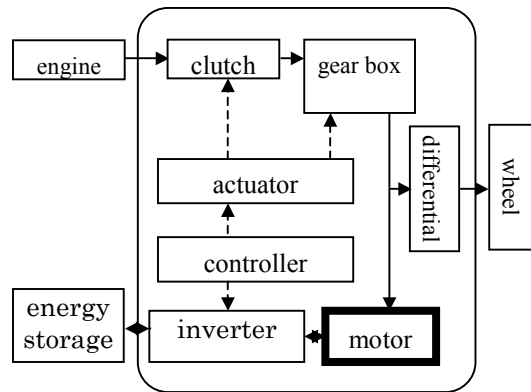


図 2.9 モータアシスト AMT 構成図

分類としてはパラレルハイブリッドの一種であるが、トルクの出力方法が異なる。パラレルハイブリッド車両はエンジンとモータが常に協調しながら駆動力を生み出すため、加速中のモータは何らかの形でトルクを出力し続ける必要がある。一方 M-AMT は、変速中に大きなパワーを出し入れする必要があるが、その時間は図 2. 10 に示すように 1 秒程度と短かくてよい点に特徴がある。そのため、モータは定格トルクが小さくても瞬時最大トルクの大きなモータを使用すればよく、従来のモータユニットを小型化することができると思われる。2005 年に開催された EVS22 において、アイシン精機よりそのコンセプトモデルが提案され、注目されている(図 2. 11)⁽¹¹⁾。

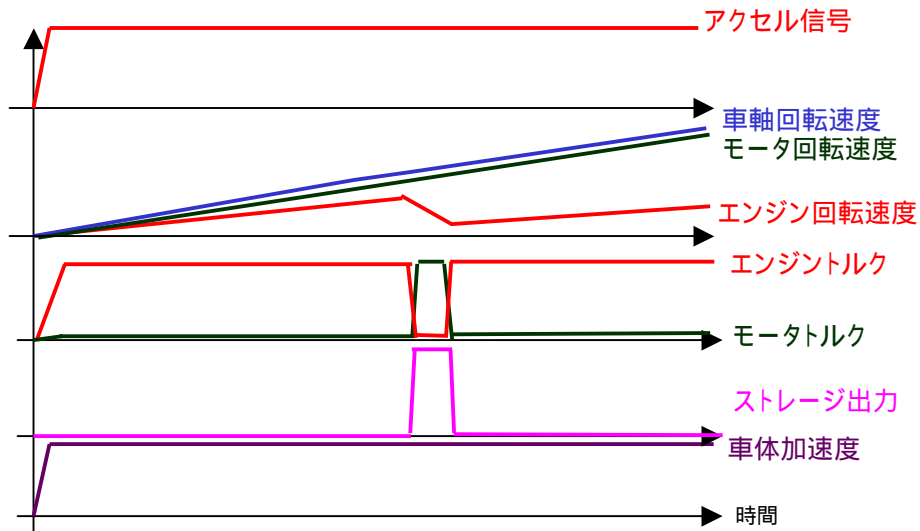


図 2. 10 モータアシスト AMT の走行パターン模式図

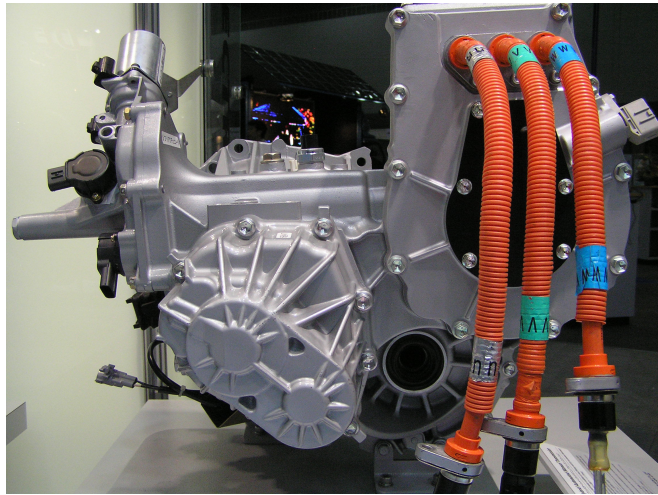


図 2.11 モータアシスト AMT の実例⁽¹¹⁾

3. エネルギーストレージデバイスの選定

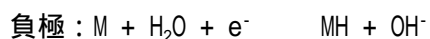
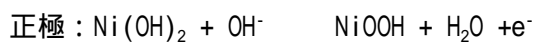
自動車に用いられた電池についてみると、その関係は意外に古く、EV の開発は内燃機関の自動車より早いとされる。また、いわゆる電池の始まりは、1800 年イタリアのボルタが発明した“ボルタの電池”が始まりとされ、電圧の単位である Volt の語源ともなっている。乾電池は 1868 年ルクレランシェ（仏）が、鉛電池は、乾電池より古く、1859 年（仏）にプランテによる発明とされる。

その後、ニッケルカドミウム電池（1899 年）の実用化をはじめ、銀電池や水銀電池など各種アルカリ電池が実用化され多種多様に進化していった。1980 年代になり、コンパクトで軽い電池への期待が強くなり、当時二次電池の代表であった鉛電池とニッケルカドミウム電池による改良が行われていたが、1990 年にニッケル水素電池が、また 1991 年にはリチウムイオン電池が相ついで実用化され、小形民生機器の進展に伴い、その市場が拡大し、また技術も進展して行った。結果的に日本がこれら新型電池の分野で、世界的に見ても重要な役割を担うまでになった。このように小形電池の分野では、急激に進化を遂げて来た二次電池であるが、EV 用電池や大形電池については、残念ながら未だ小形に匹敵する大きな市場は無いのが現状である。

3.1 ニッケル水素電池

1990 年代以降の小型携帯機器の普及を縁の下で演出したのがニッケル水素電池である。入出力性能・耐久性及び電池制御技術の確立により、1997 年末に、世界初の量産 HEV「プリウス」の電源としても採用された。

ニッケル水素電池は、正極にニッケル酸化物、負極に水素吸蔵合金（以下、合金と称す）に貯蔵した水素を用いた二次電池である。ニッケル水素電池の充放電反応は以下の式で表すことができる。



正極活物質はニッケルカドミウム電池と同様、水酸化ニッケルで、充電により結晶よりプロトンが脱離してオキシ水酸化ニッケルとなる。負極活物質は M で示す水素吸蔵合金であり、水素が合金内に吸蔵される。電解液は KOH を溶解した水溶液が使用されている。電圧は 1.2V で、ニッケルカドミウム電池や、マンガン電池等の多くの水溶液系電池と互換性がある。

電池電圧が 1.2V とニカド電池と互換性を有しながら、高容量・環境に優しい電池であり、1990 年代の携帯電話をはじめとする小型携帯機器の本格普及と相乗効果を生みながら市場に受け入れられた。民生機器用電池の技術を更に発展させ、HEV 用電源が実用化されて

いる。

初期の HEV には、民生用電池に比べ出力性能を飛躍的に向上させた、単 1 サイズ円筒形電池を 240 本直列接続したパック電池が搭載された。実用化のためには、従来の電池単体の開発に加え、パック構造技術や制御技術などの異種技術の融合が重要であった。

その後、コストの低減、車両搭載自由度の拡大に向けた省スペース化、寿命特性などの市場信頼性の向上を強く要望され、次世代型電池の開発が行なわれた。その結果、6 セル一体型の角形モジュール電池が実用化された⁽¹²⁾。この電池は、正・負極板に用いられる基本材料の改良は勿論、溶接技術・極板切断工法・気密性検査技術など、一見、電池技術とは無関係に思われるような技術・工法を開発することにより実現した。2000 年に、この電池は 288 セル（48 パック）直列接続され、新型 HEV に搭載され、体積で 40%の省スペース化、重量で 20%の軽量化を実現した。



図 3.1 Ni-MH 電池セル(Prius)

3.2 リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は、1991 年の実用化以降、軽量・高エネルギー密度という特長を活かし、それまで主流であったニッケル水素電池に替わりノート PC および携帯電話の主電源として広く使用されるようになった。電池は円筒形と角形に大別され、主に円筒形はノート PC に、角形は携帯電話に使用されている。またデジタルカメラ・AV 機器、さらにパワー系用途である電動工具にも広く使用されている。今後、車載用途への展開も期待されている。

実用化当初より正極にコバルト酸系材料、負極に黒鉛を用いた「第一世代イオン」が主流であった。過去、正極粉末の粒子形態や粒度分布制御で電極の充填密度を上げて高容量化が図られてきた。充電電圧を従来の 4.2V から上昇させると、材料の変更をせずに電池の高容量化が可能となる。しかしながら、特に高温使用時での信頼性に劣ることが分かっている。そのため、電解液材料や正極材料の改善が行なわれている。

2006 年に、上記技術を採用した「第二世代イオン」が実用化され、620Wh/L の高エネルギー密度化が可能となり、15 年間で容量が約 3 倍に向上した。「第二世代イオン」は、「第一世代イオン」と比較し、容量の他、高温保存性能と低温放電性能に優れる。「第一世代イオン」は、充電状態で高温下に放置すると容量が低下し、その後充電しても回復しないと

という課題があった。これは、正極材料の耐電解液安定性能に起因し、より高電圧・高温で放置するほど顕著である。「第二世代イオン」は、高温充電保存時の容量低下が非常に小さい電池で、充電状態で高温放置されることの多いノートパソコン用途に適した電池である。また、「第一世代イオン」は、0 以下の低温域では電圧低下が大きいため使用条件によっては十分な性能を発揮出来ない場合があった。それに比較し、「第二世代イオン」は、低温域でも電気化学反応性に富むため電圧低下が小さく、安定した電源性能を発揮する。

さらなる高容量化を目指し、「第三世代イオン」用の新たな材料開発が始まっている。例えば黒鉛負極に代わる材料として、珪素や錫系の合金が追究されているが、これら材料の最大課題は膨張で、その解決策としてナノテクノロジーによる合金の微粒子化など材料プロセス技術が検討されている。

リチウムイオン電池は可燃性である有機電解液を使用している。そのため 150 以上の加熱や火中投下はもとより、過充電、外部圧力による圧壊、釘刺しなど使用法を誤ると発熱、発煙、発火、破裂など不安全な状態に至る可能性がある⁽¹³⁾。そのため、例えば、それぞれの電池に保護回路をつけるなどの安全処置が施されてきた。今後の電池の高容量化、高性能化に伴い更なる安全技術の向上が望まれる。

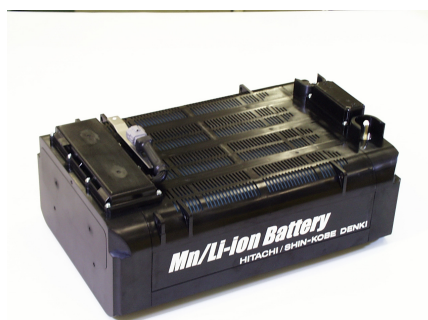


図 3.2 EV 用のリチウムイオン電池⁽¹⁴⁾

3.3 電気二重層キャパシタ

物理現象としての電気二重層は 1879 年にドイツの生理学・物理学者 Helmholtz により発見され、電解液に電極を浸すと電極側境界面に絶縁層の第 1 層と、溶媒分子とイオンが拡散した第 2 層の薄い二重層が形成される現象である。図 3.3 は電気二重層キャパシタの構造を模式的に示したもので、電極に電圧を印加すると正極と負極の絶縁層部分にそれぞれマイナスイオンとプラスイオンが吸着されて静電容量が非常に大きなキャパシタとなる⁽¹⁵⁾。

電気二重層キャパシタは化学反応を用いないため二次電池と比較して電力密度が大きく寿命も長い特長があり、自動車等への適用が進行している。

また、自動車などの移動体用として重要視されるエネルギー密度と耐久性の向上も著しい。活性炭電極と有機系電解液の組み合わせによる標準的な電気二重層キャパシタでも過

去 10 年間にエネルギー密度が 2 倍以上向上している。電解液は海外では性能面で有利なアセトニトリルが使用されているが，国内では安全上の問題がほとんどないプロピレンカーボネートが一般的である。活性炭とは異なる炭素材料を用いた高性能電気二重層キャパシタ

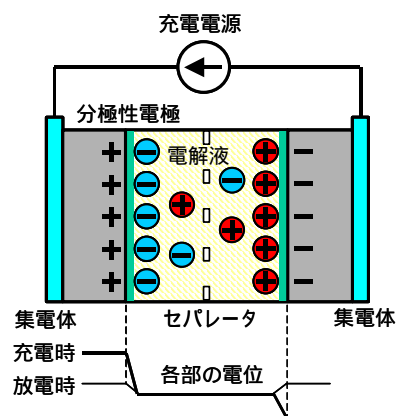


図 3.3 電気二重層キャパシタの構造

タも実用化を目指して開発が進められている。図 3.4 に電気二重層キャパシタの例を示す。



図 3.4 電気二重層キャパシタの製品例

3.4 M-AMT に適したエネルギーストレージデバイスの選定

これらのエネルギーストレージデバイスにはそれぞれ得意分野、苦手分野があり、使用目的に応じて使い分ける必要がある。それぞれの代表的特性を表 3.1 に示す⁽¹⁶⁾。

表 3.1 エネルギーストレージデバイス代表特性

	ニッケル水素	リチウムイオン	電気二重層キャパシタ
電力密度[W/kg]	~ 700	~ 2500	~ 4000
エネルギー密度[Wh/kg]	~ 50	~ 150	~ 15
放電深度(%)	50~70	80~90	94~100
充電効率	~0.8	~0.8	~0.95
残量計測	困難	比較的容易	容易
サイクル寿命	300 ~ 1000	500 ~ 1000	-

M-AMT は 2 章でとりあげたように、システムとして瞬間的な大電力の出し入れを頻繁に行う。そのためエネルギーストレージデバイスに求められる仕様は、電力密度が高く、サイクル寿命の長いことである。その点において電気二重層キャパシタは M-AMT の電源として適しているといえることができる。そこで、以降は M-AMT のエネルギーストレージとして電気二重層キャパシタを用いることを前提とし、その成立性や課題について検討を行う。

4. HEV 車両のエネルギー効率に関する考察

この章では設計問題としてエンジンとモータ、エネルギーストレージの重量配分について取り扱う。ハイブリッド車両の設計において、モータとエンジンの重量配分とその駆動方法の選択は重要な項目である。そもそもハイブリッド車両はエンジンとモータという同じ働きの出力要素を搭載する必要があるため、設計次第では重量の増加に伴い効率が悪化してしまう可能性すら孕んでいる。そこで、この章ではエンジンやモータ、エネルギーストレージの重量を考慮に入れた車両のエネルギー効率に関する考察を行う⁽¹⁾。まず一般走行の速度パターンを3種のパラメータを用いてモデル化し、非 HEV 車や従来型 HEV 車、そして提案する M-AMT 車の3者について、最適なエネルギー効率が得られる重量配分を解析的に求める。さらに、車体重量を変数としてみた場合にその最高エネルギー効率自体が車体重量によりどのように変化するかを示し、電気二重層キャパシタとモータアシスト式 AMT という組み合わせが軽車両のエネルギー効率改善に有効であるということを理論的に裏づける。まず、計算に必要な物理量を以下のように定義する。

車体質量(エンジン・モータ等除く)	: M_B
エンジン質量	: M_E
電動部位質量(電池をのぞく)	: M_M
バッテリー質量	: M_S
車両重量(全体)	: $M = M_B + M_E + M_M + M_S$
空気抵抗係数	: γ
摩擦係数	: μ
重力定数	: g
エンジン出力	: P_E
モータ出力	: P_M

4.1 実車両の重量分析⁽²⁰⁾

考察を始めるにあたり、現状の車両がどのような重量配分で構成されているかを調査する。まず、調査を行うに当たり、サンプルとして取り上げた市販車の諸元を表 4.1 に示す。

表 4.1 参考車諸元表

	エンジン排気量 [ml]	車両重量 [kg]	エンジン最大出力 [kW]	エンジン最大トルク [Nm]
GS350	3500	1650	232	377
GS460	4600	1740	255	460
IS250	2500	1570	158	260
IS350	3500	1600	234	380
シビック 1.8	1800	1240	103	174
シビック 2.0	2000	1280	114	188
フィット 1.3	1330	1080	73	127
フィット 1.5	1500	1100	88	145
ヴィッツ 1.0	1000	1000	52	94
ヴィッツ 1.3	1300	1030	64	116
ヴィッツ 1.5	1500	1060	81	141

最初に排気量を媒介パラメータとしてエンジンの最大出力 P_E とエンジン重量 M_E の関係を調査する。表 4.1 に示した車両は、エンジン排気量のみが異なる同一車両における、重量や出力の比較表である。これらのデータを元に、「同一車両間では車体の重量は変わらない」という仮定で一次補間を行えば、エンジンのみの重量とエンジン排気量の間関係を推定することが可能である。エンジン排気量とエンジン重量の関係をグラフ化したものを図 4.1 に示す。

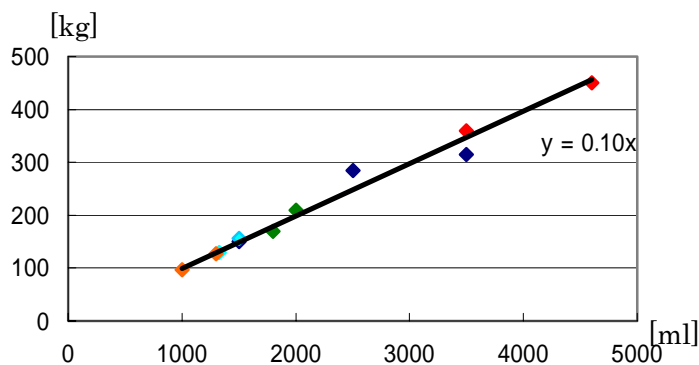


図 4.1 エンジン排気量-エンジン重量相関図

図 4.1 から、エンジン重量 M_E とエンジン排気量 V_E の間には線形関係があり、

$$M_E = 0.10V_E \quad (4.1)$$

という式で表せるということがわかる。

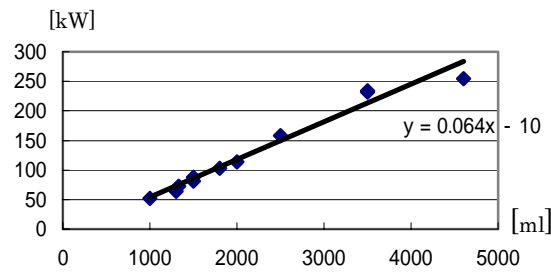


図 4.2 エンジン排気量-エンジン出力相関図

一方図 4.2 はエンジン排気量とエンジン最大出力の関係をグラフ化したものである。図から、エンジン最大出力 P_E とエンジン排気量 V_E の間にも明らかな線形関係があり、

$$P_E = 0.064V_E - 10 \quad (4.2)$$

という式で表現できることがわかる。

図 4.1、図 4.2 のグラフを元に、エンジン重量とエンジン最大出力の間の関係をグラフ化した。結果を図 4.3 に示す。

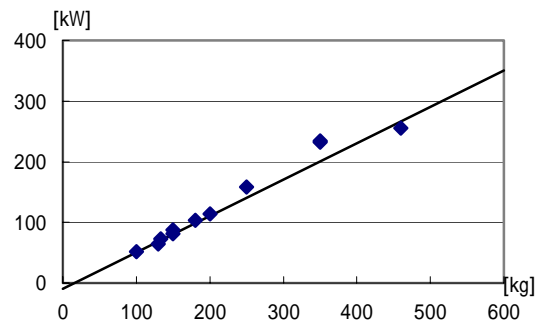


図 4.3 エンジン重量-エンジン最大出力相関図

この図からエンジン重量 M_E と最大出力 P_E の間には線形な関係があるということが出来る。そこで以降ではこの 2 者の間には(4.3)のような線形の関係があるとして解析を進める。

$$P_E = \gamma_E M_E + P_{E0} \quad (4.3)$$

ただし、 $\gamma_E=0.64[\text{kW/kg}]$

ただし、 $P_{E0}=-10[\text{kW}]$

次に、モータやインバータなどの電気駆動ユニットの重量とその出力の関係についても調査する。サンプルとして取り上げた市販車の諸元を表 4.2 に示す。

表 4.2 参考車諸元表

	エンジン 排気量 [ml]	エンジン 重量 [kg]	エンジン 出力 [kW]	モータ 出力 [kW]	エンジン 推定重量 [kg]	電池重量 [kg]
ハリアー	2360	1600	118	-	236	-
ハリアーHEV	3300	1930	155	173	330	86
エスティマ	2360	1700	125	-	236	-
エスティマ HEV	2360	1930	110	155	236	86
クラウン	3500	1650	232	-	350	-
クラウン HEV	3500	1840	218	147	350	67
シビック	1800	1240	103	-	180	-
シビック HEV	1300	1290	69	15	130	55

表 4.2 は、同一車両内において HEV 設定のある車両とない車両を持つ車両の諸元表である。本考察では「HEV システムを M-AMT 方式に」、「エネルギーストレージをキャパシタに」した場合に燃費が変化するかを考えるものであるため、これらのデータを元に、「電池をのぞく電動部位の重量」をいかに過不足なく抽出するかが肝心になる。表 4.2 に示した各車両はエンジンの排気量や電池重量などがそれぞれ異なるが、ベースとなる車体の重量が等しいとすれば、両者の差からエンジン重量と電池重量を取り除いたものが、その車両を HEV 化するために必要であった「電池をのぞく電動部分の重量」を意味する。従って、ここで求める電池をのぞく電動部位の重量 M_M とは、モータ、インバータ、ドライバ、冷却器、ハーネス等を含む全ての装備の重量を意味する。

表 4.2 のデータを元に、電動部位重量 M_M とモータ出力 P_M の関係をグラフ化したものを図 4.4 に示す。

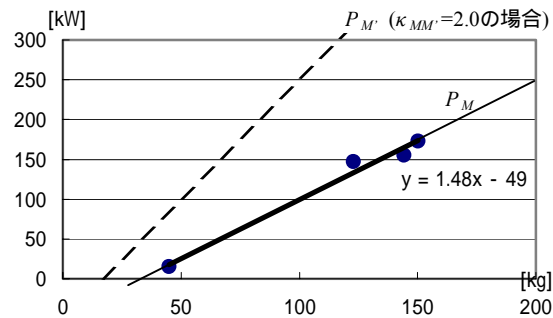


図 4.4 モータ最大出力-電動部位重量相関図

この図からエンジン重量 M_E と最大出力 P_E の電動部位重量 M_M とモータ出力 P_M の間には線形な関係があると言することができる。そこで以降ではこの 2 者の間には(4.4)のような線形な関係があるとして解析を進める。

$$P_M = \gamma_M M_M + P_{M0} \quad \dots(4.4)$$

ただし、 $\gamma_M=1.48$ [kW/kg]

$P_{M0}=-49$ [kW]

ところで、本研究で検討対象としている M-AMT は、2 章で説明したように、モータの最大出力を常に使用するわけではないため、定常最大出力 P_M ではなく瞬間最大出力 P_M' が後述の設計条件を満たせばよい。一般的にモータの定常最大出力と瞬間最大出力ではカタログ値で 2~5 倍ほどの差があるため、この車両の調査結果をそのまま M-AMT 車両に当てはめると、かなり保守的な設計になってしまう。そこで、これを補正するために、定常最大出力 P_M と瞬間最大出力 P_M' の倍率 $\kappa_{MM'}$ なる設計定数を新たに定め、瞬間最大出力を以下のように定式化する。

$$P_M' = \kappa_{MM'} \gamma_M M_M + P_{M0} \quad \dots(4.5)$$

図 4.4 には $\kappa_{MM'}=2.0$ と仮定した場合の出力線を破線で示している。以降の考察においては、M-AMT 車のモータ瞬間最大出力には $\kappa_{MM'}=2.0$ の P_M' を用いて考察を進めるものとする。

エネルギーストレージに関しても、重量と電力、エネルギー容量は線形な関係があるとみなし、(4.4)、(4.5)の式が成り立つと仮定する。比例定数はエネルギーストレージの種類により異なるため、ここでは提示しない。

エネルギーストレージ最大出力 P_S

$$P_S = \gamma_S M_S \quad \dots(4.6)$$

エネルギーストレージエネルギー容量 U_S

$$U_S = \sigma_S M_S \quad \dots(4.7)$$

本考察はハイブリッド車両のエンジンの重量とモータの重量、およびエネルギーストレージの重量を燃費が良くなるように最適化して、そのときの燃費を解析的に求めようというものである。したがって3変数の設計問題であるということが出来るが、できる限り単純化して数式で解析的に求めることを優先するため、相関性の高いモータの質量とエネルギーストレージの重量をまとめてひとつの「電動ユニット」として捉え、この問題をエンジンの重量 M_E と電動ユニットの重量 M_U の2変数の問題に単純化することを考える。

まず最低条件として、最大出力が P_M であるモータの性能を過不足なく発揮するためには、それを負担する電池やキャパシタなどのエネルギーストレージの最大出力 P_S は少なくとも P_M を上回る必要がある。従って以下の式が成り立つ必要がある。

$$P_S \geq P_M \quad \dots(4.8)$$

一方で、エネルギーストレージの最大出力がモータの最大出力を負担できるほど十分大きければ、エネルギーストレージの重量は軽ければ軽いほど燃費が良くなることは自明である。求めたいのは最適化されたときの燃費であることから、以降では、

$$P_S = P_M \quad \dots(4.9)$$

すなわちモータの出力とエネルギーストレージの出力は常に等しいとする。このときのエネルギーストレージの質量は、(4.3)および(4.4)を解いて以下のように計算される。

$$M_S = \frac{\gamma_M}{\gamma_S} M_M + \frac{P_{M0}}{\gamma_S} \quad \dots(4.10)$$

このように仮定した上で、新たにモータとエネルギーストレージの質量の和を M_U と定義すると、以下の関係式が得られる。

電動ユニット最大出力 P_U

$$P_U = \gamma_U M_U + P_{U0}$$

ただし、 $M_U = M_M + M_S$

$$\gamma_U = \gamma_M \gamma_S / (\gamma_M + \gamma_S)$$

$$P_{U0} = P_{M0} \gamma_S / (\gamma_M + \gamma_S) \quad \dots(4.11)$$

式(4.11)を用いてユニット質量とその出力の関係をグラフ化した結果を図 4.5 に示す。以降はこの関係を用いてエンジンの質量と電動ユニットの質量を最適化する 2 変数の設計問題として考察を進める。

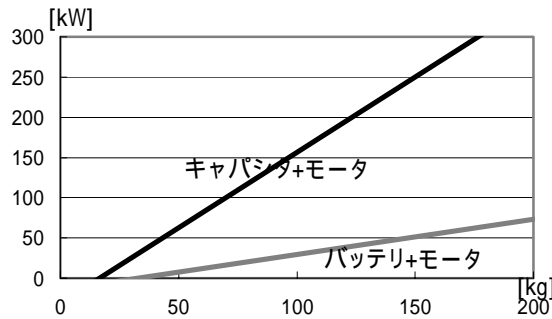


図 4.5 電動ユニット最大出力-電動ユニット重量相関図

4.2 定められたモードにおけるエネルギー効率の調査とその分析

車両の走行には図 4. 6a に示すような一般的な加減速、図 4. 6b に示すような高速巡航、図 4. 6c に示すような渋滞走行、図 4. 6d に示すようなスポーツ走行など、さまざまな走行パターンが考えられる。

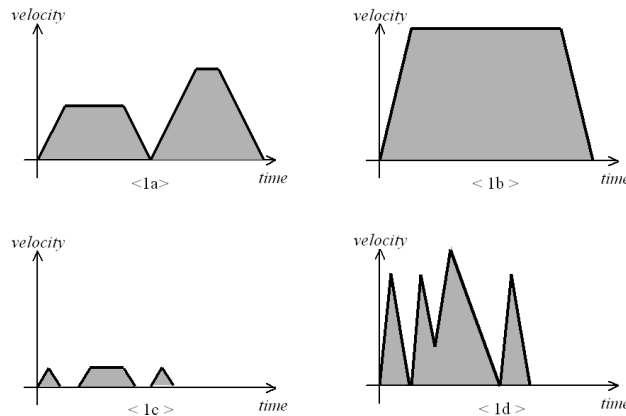


図 4. 6 さまざまな走行パターン

車両のエネルギー消費量は走行パターンに大きく依存するため、通常の燃費測定においては、10-15モード(日本)、US06モード(米国)のように、走行パターンを指定して評価を行う。

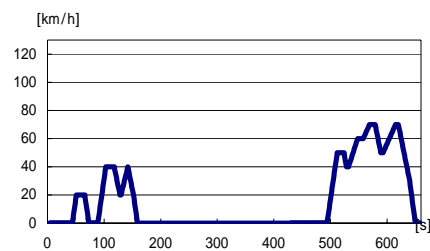


図 4.7 10.15 モード

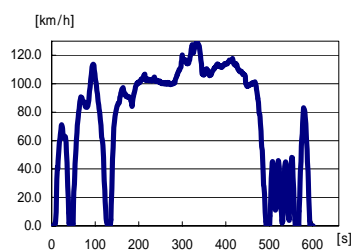


図 4.8 US06 モード

本論文では、より広範かつ解析的な検討を行うため、走行パターンの一般化を行う。

まず、車両が停車状態から加速し、一定速度で走行した後、減速し停車するまでを一行程と定義する。 v_{max} は一行程中における最高速度であり、加速度 α はその行程における加速度ならびに減速度と定義する。簡単のため一行程中においては加速度と減速度は同一で一定であるとする。巡航割合 ψ は一行程における一定速走行の距離の占める割合であり、 ψ が 0 のときは一定速走行を行わず加速後即減速をする走行パターン、 ψ が 1 に近づくほど巡航距離が長い走行パターンを意味する。それぞれのパラメータの定義を図 4.9 に模式的に示す。

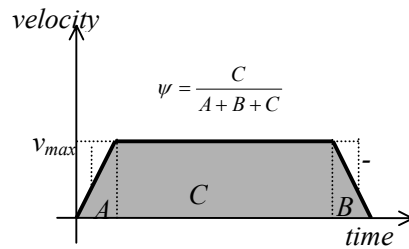


図 4.9 走行条件パラメータの定義

この3種類のパラメータを用いれば、例えば高速巡航は v_{max} が大きく ψ が大きい走行パターンであり、渋滞走行は v_{max} が小さく ψ が小さい走行パターンであると言い換えることができる。それぞれの条件でエネルギー効率の計算を行えば、条件による違いを考察することが可能になる。

また、図 4.10 に示すように、従来のモード走行パターンも提案する走行パターンのパラメータに置き換えることにより、例えば 10・15 モードはおよそ $S(40,3.0,0.4) \sim S(70,3.0,0.6)$ の混合、US06 モードは $S(50,8.0,0.3) \sim S(130,8.0,0.7)$ の混合瘦躯であるというように一般化することが可能である。

以降ではこの $S(v_{max}, \alpha, \psi)$ という表現を用いて解析を進める。

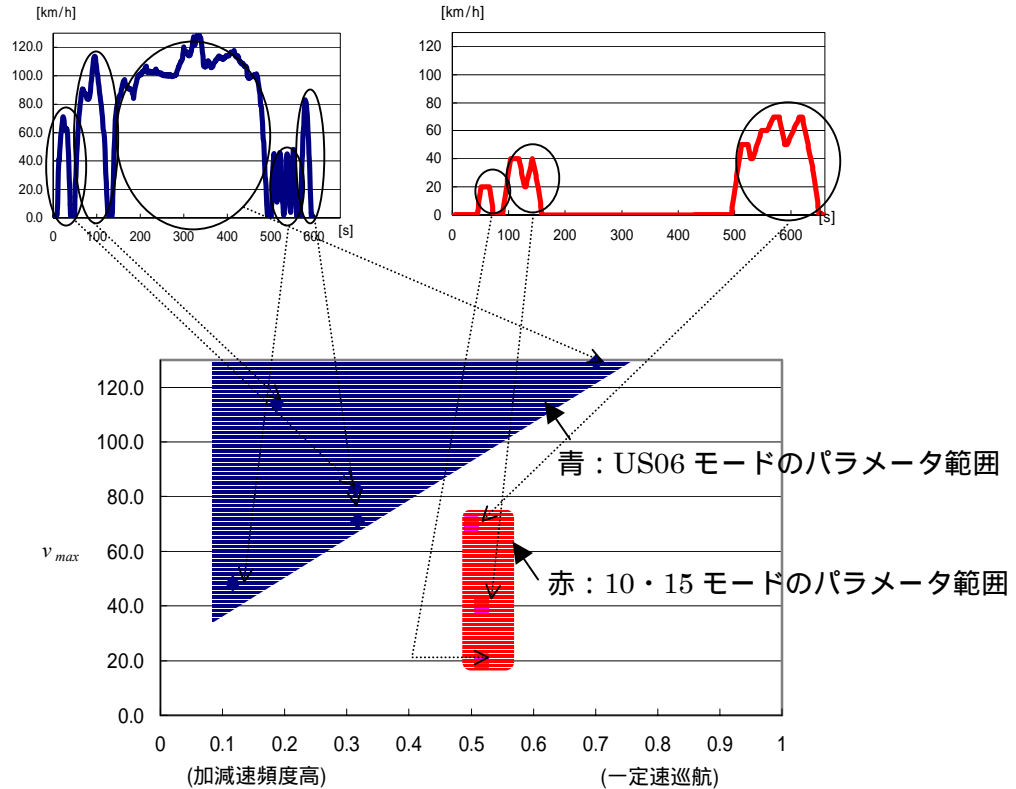


図 4.10 一般化した走行パターンパラメータと従来のモード走行の関係

4.3 設計制約に関する考察

4.3.1 必要出力の計算

搭載するエンジンやモータの重量を軽量化すればエネルギー効率は高まるので、エンジンやモータはできる限り小さくすることが望ましい。しかしながら、軽量化しすぎるとトルクやパワーが足りなくなるため、加速性や最高速度といった走行性能が悪くなる。そのため、エンジンやモータが確保すべき性能を考える。

一般に、自動車の走行車速を v_{body} 、加速度を a とすると、車両の加速に必要な駆動力 F_{acc} は以下の式であらわされることが知られている⁰⁾。

$$F_{acc} = Ma + \mu Mg + \gamma v_{body}^2 + Mg\theta_g \quad \dots(4.12)$$

ただし、
 μ : 摩擦係数
 γ : 空力係数
 θ_g : 路面勾配

したがって、ある瞬間に車両を駆動するのに必要な駆動出力（パワー） P_{acc} は、仕事の定義より以下のようにあらわされる。

$$P_{acc} = Mav_{body} + \mu Mgv_{body} + \gamma v_{body}^3 + Mg\theta_g v_{body} \quad \dots(4.13)$$

この式に基づき、車両がある特定の走行パターンを走行するときの出力について考察する。

まず例として、図 4.11 に $M=600[\text{kg}]$ 、 $\theta_g=0$ とした場合の 10-15 モードにおける駆動出力の計算結果を示す。この走行パターンにおいては、300[s]および 345[s]付近において、最大出力 $P_{acc}=10[\text{kW}]$ の出力が必要である事がわかる。すなわちこの車両を 10-15 モードで走行させるためには、少なくとも 10[kW]以上の出力を持つパワートレインを搭載しなければならない。

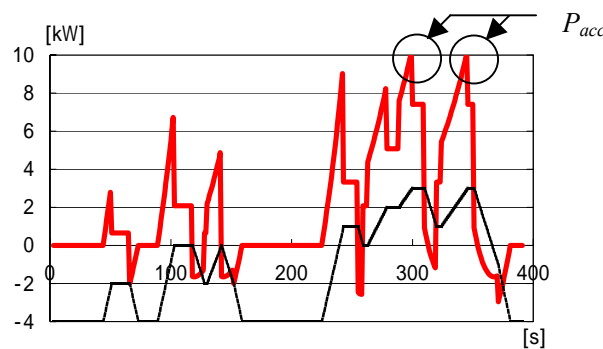


図 4.11 10-15 モードにおける駆動出力(M=600[kg])

同様に、図 4.12 に $M=600[\text{kg}]$ 、 $\theta_g=0$ とした場合の US06 モードにおける駆動出力の計算結果を示す。この走行パターンにおいては、300[s]付近において、最大出力 51[kW]の出力が必要である事がわかる。

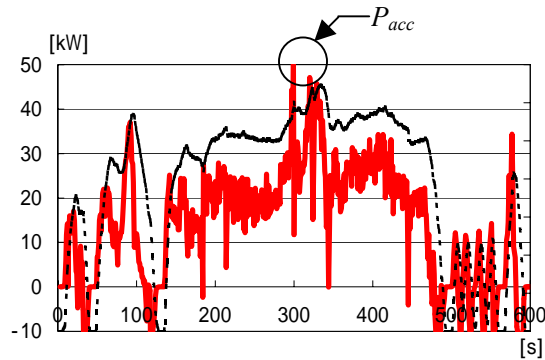


図 4.12 US06 モードにおける駆動出力($M=600[\text{kg}]$)

このように、走行したいパターンと車両諸元、特に車両重量を決めれば、パワートレインに必要な最大出力は計算により導くことができる。ただし、車両重量 M にエンジンやモータの重量が含まれていることに注意を要する。

設計条件として走行パターン $S_D(v_{max}, \alpha, \psi)$ が与えられた場合は、最大の出力が要求されるのは加速中の最高速度に達した瞬間である。そのときの瞬間消費出力 P_{acc} は(4.14)で与えられる。

$$P_{acc} = Mav_{max} + \mu Mg v_{max} + \gamma v_{max}^3 + Mg \theta_g v_{max} \quad \dots(4.14)$$

ここで P_{acc} は車両重量 M の関数であり、モータ重量 M_M やエンジン重量 M_E を内部に含む関数であるということに注意が必要である。

4.3.2 モータ・エンジンの必要出力の検討

従来型 HEV と提案する M-AMT では駆動方式が大きく異なるため、必要最大出力 P_{acc} が決まっても一意にモータやエンジンの重量を決定することはできない。ここではその考え方について述べる。

従来型 HEV の場合、2章で詳述したように、システムの的にモータとエンジンは同時に出力を駆動力として放出することができる。従って従来型 HEV においては、モータとエンジンは以下の出力要件を満たせばよい。

$$P_E + P_M > P_{max} \quad \dots(4.15)$$

例として $P_{acc}=20[\text{kW}]$ であった場合の出力条件を図 4.13 に模式的に示す。この図のハンチングされている領域においては、パワートレインの出力が足りないため、与えられた走行パターン S_D を走破可能な従来型 HEV を設計することができない。

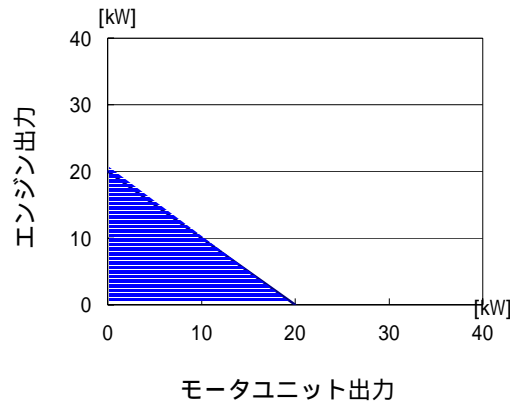


図 4.13 従来型 HEV のモータユニット / エンジン出力条件

一方 M-AMT の場合、エンジンのトルク遮断時のトルクをモータが補償しなければならないため、エンジンとモータは各々が P_{acc} 以上の出力を放出する必要がある。従って M-AMT 車の満たすべき出力要件は以下のように表される。

$$\begin{cases} P_E \geq P_{acc} \\ P_U \geq P_{acc} \end{cases} \quad \dots(4.16)$$

例として $P_{acc}=20[\text{kW}]$ の場合の出力条件を図 4.14 に図示する。この図のハンチングされている領域においては、パワートレインの出力が足りないため走行パターン S_D を走破可能な M-AMT 車両を設計することができない。

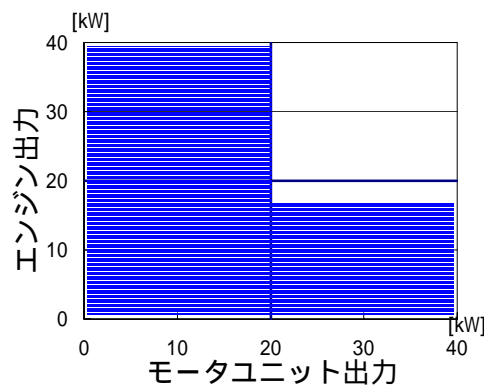


図 4.14 M-AMT のモータユニット / エンジン出力条件

4.3.3 重量条件をパラメータとした設計制約

次に、これを重量配分の条件に置き換えることを考える。

従来型 HEV の場合、まず、エンジン単独の出力やモーター単独の出力で出力条件を満たすことができるならば、そもそもハイブリッドにしなくても与えられた制約条件 S_D (v_{max}, α, ψ)での走行は可能である、それは以下の2式で表現される。

$$P_U \geq P_{acc} \quad \dots(4.17)$$

$$P_E \geq P_{acc} \quad \dots(4.18)$$

これら(4.17)(4.18)と(4.15)の不等式を、(4.1)および(4.9)を用いて重量 M_E, M_U について解くと、以下の式が得られる。

$$(\gamma_E - \Gamma)M_E - \Gamma M_U \geq \Gamma M_B + \mathcal{W}_{max}^3 - P_{E0} \quad \dots(4.19)$$

$$\Gamma M_E + (\gamma_U - \Gamma)M_U \geq \Gamma M_B + \mathcal{W}_{max}^3 - P_{U0} \quad \dots(4.20)$$

$$(\gamma_E - \Gamma)M_E + (\gamma_U - \Gamma)M_U \geq \Gamma M_B + \mathcal{W}_{max}^3 - P_{E0} - P_{U0} \quad \dots(4.21)$$

ただし、 $\Gamma = (\alpha + \mu g)v_{max}$

図 4.15 に制約条件 S_D が与えられたときの従来型 HEV の設計可能領域を示す。この図のハンチングされている領域のエンジン/モータの組み合わせでは、パワートレインの出力が足りないため、与えられた走行パターン S_D を走破可能な従来型 HEV を設計することができない。

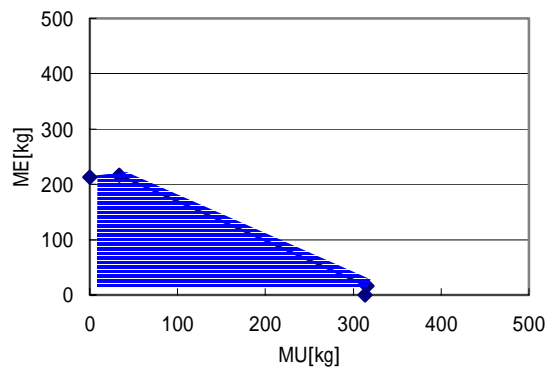


図 4.15 従来型 HEV のモータユニット/エンジン重量条件

M-AMT の場合は、(4.14)を満たせば自動的に(4.15)および(4.16)を満たすため、重量条件は以下のように表される。

$$\begin{cases} (\gamma_E - \Gamma)M_E - \Gamma M_U \geq \Gamma M_B + \gamma_{\max}^3 - P_{E0} \\ \Gamma M_E + (\gamma_U - \Gamma)M_U \geq \Gamma M_B + \gamma_{\max}^3 - P_{U0} \end{cases} \quad \dots(4.22)$$

図 4.16 に制約条件 S_D が与えられたときの従来型 HEV の設計可能領域を示す。この図のハンチングされている領域のエンジン/モータの組み合わせでは、パワートレインの出力が足りないため、与えられた走行パターン S_D を走破可能な M-AMT を設計することができない。

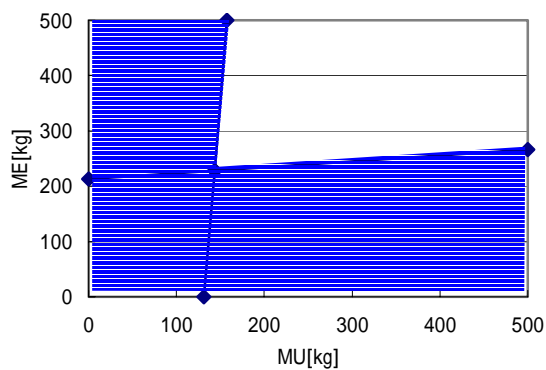


図 4.16 M-AMT のモータユニット/エンジン重量条件

4.4 エネルギー効率計算

本章の目的である、車両が走行条件 $S(v_{max}, \alpha, \psi)$ という条件で走行した場合の消費エネルギーを定量的に計算する。

4.4.1 加速中消費エネルギー

走行条件 S の加速中において、加速度 α で車速 v_{max} まで加速中するとき、加速に要する時間は v_{max}/α で、そのときに進む距離は $v_{max}^2/2\alpha$ である。したがって加速中のパワートレインのエネルギー消費量 W_A は、仕事の定義より、推力を距離で積分することで(4.23)のようにならわされる。

$$W_A = \int_0^{v_{max}^2/2\alpha} (M\alpha + \mu Mg + \gamma v^2) dx \quad \dots(4.23)$$

これを解いて、(4.24)が得られる。

$$W_A = \left(1 + \frac{\mu g}{\alpha}\right) \frac{M}{2} v_{max}^2 + \frac{\gamma}{4\alpha} v_{max}^4 \quad \dots(4.24)$$

4.4.2 巡航中消費エネルギー

走行条件 S の巡航中において、その一定速度走行距離 L_C は、 v_{max} , α , ψ を用いて(4.25)のように表すことができる。

$$L_C = \frac{\psi}{1-\psi} \frac{v_{max}^2}{\alpha} \quad \dots(4.25)$$

従って、巡航中のパワートレイン消費エネルギー W_C は(4.26)のように表される。

$$W_C = (\mu Mg + \gamma v_{max}^2) \frac{\psi}{1-\psi} \frac{v_{max}^2}{\alpha} \quad \dots(4.26)$$

4.4.3 減速中消費エネルギー

減速中にはパワートレインはエネルギーを消費しないので、消費エネルギーは0とみなすことができる。しかし、4.4.4節において回生エネルギーを計算する必要があるため、ブレーキで消費されるエネルギーについて計算を行う。このエネルギー W_B は(4.23)と同様に考え、(4.27)であらわされる。

$$W_B = \int_0^{v_{\max}^2/2\alpha} (M\alpha - \mu Mg - \gamma^2) dx \quad \dots(4.27)$$

これを解いて、(4.28)が得られる。

$$W_B = \left(1 - \frac{\mu g}{\alpha}\right) \frac{M}{2} v_{\max}^2 - \frac{\gamma}{4\alpha} v_{\max}^4 \quad \dots(4.28)$$

4.4.4 回生エネルギー

さて、前述の W_B の $100\eta\%$ が回生エネルギーとして回収され、インバータや DC コンバータ等のエネルギー変換器を介してエネルギーストレージに伝送されたとすると、エネルギーストレージに送電される電気エネルギーの総量 W_R は(4.29)のようにならわされる。

$$W_R = \eta W_B \quad \dots(4.29)$$

η : 変換器効率

しかしながら、エネルギーストレージにはエネルギー容量という上限があり、容量以上のエネルギーを蓄えることができない。その最大エネルギー容量を W_V とおくと、すでに W_V はエネルギーストレージ質量 M_S に比例すると(4.5)で仮定していることから、容量 W_V は(4.30)とあらわされる。

$$W_V = \sigma_S M_S \quad \dots(4.30)$$

容量より大きな回生エネルギーに関しては、ストレージに蓄えられずに熱として放出すると仮定すると、エネルギーストレージに蓄えられる電気エネルギー W_S は W_V の大きさにより以下のように表現することができる。

$$W_S = \begin{cases} \eta W_B & (D < 0) \\ \sigma_S M_S & (D \geq 0) \end{cases} \quad \dots(4.31)$$

$$\text{ただし、} \quad D = \frac{W_R - W_V}{W_V} = \eta \left(1 - \frac{\mu g}{\alpha}\right) \frac{M}{2} v_{\max}^2 - \frac{\eta \gamma}{4\alpha} v_{\max}^4 - \sigma_S M_S \quad \dots(4.32)$$

最終的に車両の運動に再利用されるエネルギー W_D は、再度エネルギー変換器の効率を考慮に入れて、(4.33)のように表現することができる。

$$W_D = \eta W_S \quad \dots(4.33)$$

4.4.5 全消費エネルギー

4.4.1 ~ 4.4.4 より、自動車のパワートレインが一行程 S を走行する間に運動のために消費するエネルギーを W_P とおくと、 W_P は(4.34)となる。これは HEV 車でない一般車両の消費エネルギーを意味する。

$$\begin{aligned} W_P &= W_A + W_C \\ &= 1 + \frac{1+\psi}{1} \frac{\mu g}{\psi} \frac{M}{\alpha} \frac{M}{2} v_{\max}^2 + \frac{1+3\psi}{1} \frac{\gamma}{\psi} \frac{\gamma}{4\alpha} v_{\max}^4 \end{aligned} \quad \dots(4.34)$$

さらに HEV システムにより(4.32)のエネルギーが回収できた場合、そのエネルギーを走行エネルギーとして再利用することができるので、正味の全消費エネルギー W_{PH} をとおくと、 W_{PH} は、 $D < 0$ の場合、

$$\begin{aligned} W_{PH} &= W_A + W_C - \eta^2 W_B \\ &= \left(1 - \eta^2 + \frac{2 - (1 - \eta^2)(1 - \psi)}{1} \frac{\mu g}{\psi} \frac{M}{\alpha} \right) \frac{M}{2} v_{\max}^2 \\ &\quad + \frac{2 + 2\psi - (1 - \eta^2)(1 - \psi)}{1} \frac{\gamma}{\psi} \frac{\gamma}{4\alpha} v_{\max}^4 \end{aligned} \quad \dots(4.35)$$

$D = 0$ の場合、

$$\begin{aligned} W_{PH} &= W_A + W_C - \eta W_S \\ &= \left(1 + \frac{1+\psi}{1} \frac{\mu g}{\psi} \right) \frac{M}{2} v_{\max}^2 \\ &\quad + \frac{1+3\psi}{1} \frac{\gamma}{\psi} \frac{\gamma}{4\alpha} v_{\max}^4 - \eta \sigma_S M_S \end{aligned} \quad \dots(4.36)$$

という数式で表現することができる。

4.4.6 エネルギー効率（燃費）計算

最終的に評価するのは燃費、すなわち走行距離あたりのエネルギー消費量である。そこで走行パターン $S(v_{max}, \alpha, \psi)$ において走行する全行程距離 $L(v_{max}, \alpha, \psi) = (L_A + L_B + L_C)$ が必要になる。 $L(v_{max}, \alpha, \psi)$ は(4.37)のように計算される。

$$L = \frac{1}{1-\psi} \frac{v_{max}^2}{\alpha} \quad \dots(4.37)$$

結論として、走行距離あたりのエネルギー消費量 $w(v_{max}, \alpha, \psi)$ は(4.38)のように計算される。

$$w = W_{PH} / L$$

$$\left\{ \begin{array}{l} = \frac{(1-\eta^2)(1-\psi)}{2} M\alpha + \frac{2-(1-\eta^2)(1-\psi)}{2} \mu Mg \\ + \frac{2(1+\psi)-(1-\eta^2)(1-\psi)}{4} \frac{\rho_{air} g C_D S_f}{2} v_{max}^2 \quad [D < 0] \\ \\ = \frac{(1-\psi)}{2} M\alpha + \frac{1+\psi}{2} \mu Mg \\ + \frac{1+3\psi}{4} \frac{\rho_{air} g C_D S_f}{2} v_{max}^2 \quad [D = 0] \\ - \frac{1-\psi}{v_{max}^2} \eta \alpha \sigma_s M_s \end{array} \right. \quad \dots(4.38)$$

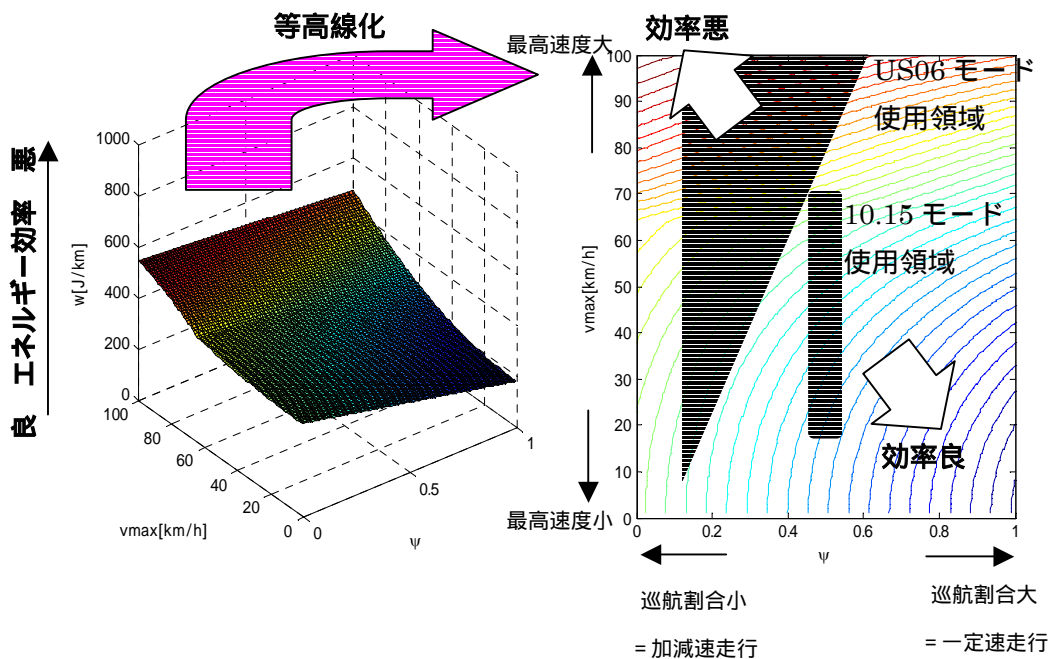


図 4.17 燃費計算結果($\eta=0.7$: HEV 車)

例として、 v_{max} , ψ を変数として、走行条件が変化するとどのようにエネルギー効率 w が変化するかを検討した。計算結果を図 4.17 に示す。

4.5 従来 HEV と M-AMT のエネルギー効率比較

4.3、4.4 の結果に基づき、色々な車体重量条件における燃費の最適化条件及び最適値を検討する。検討すべき条件を絞るため、設計制約 S_D は $v_{max}=150[\text{km/h}]$, $\alpha=2.0[\text{m/s}^2]$, $\psi=0.5$ で全車共通であるとする。

まず、走行条件と車両諸元が与えられたとき、最適なエンジンとモータの重量配分をどうすべきかを検討する。エネルギー効率を計算するための走行条件 S は $v_{max}=50[\text{km/h}]$, $\alpha=2.0[\text{m/s}^2]$, $\psi=0.5$ とし、車体重量 M_B を固定して各条件における M_E と M_U の最適設計値を検討した。図 4.18 に $M_B=500[\text{kg}]$ の場合、図 4.19 に $M_B=2000[\text{kg}]$ の場合、図 4.20 に $M_B=5000[\text{kg}]$ の場合の燃費解析結果をそれぞれ示す。図中で黒くハンチングされた領域は、4.3 の検討で求めた設計不可能領域であり、その中の条件では HEV 車両として成立しない。

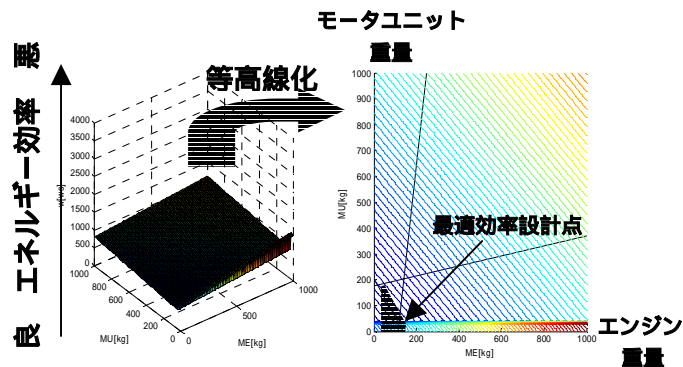


図 4.18(a) 燃費結果($M_B=500.0$ 従来型 HEV)

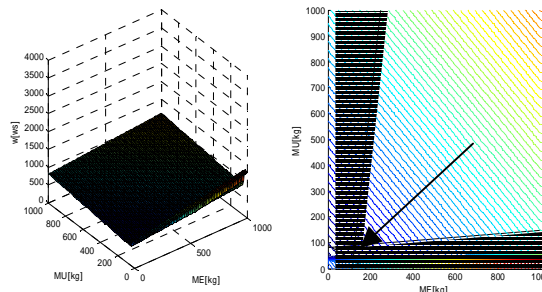


図 4.18(b) 燃費計算結果($M_B=500.0$ M-AMT)

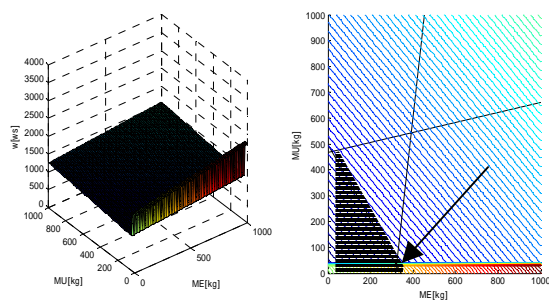


図 4.19(a) エネルギー効率計算結果($M_B=2000.0$ 従来 HEV)

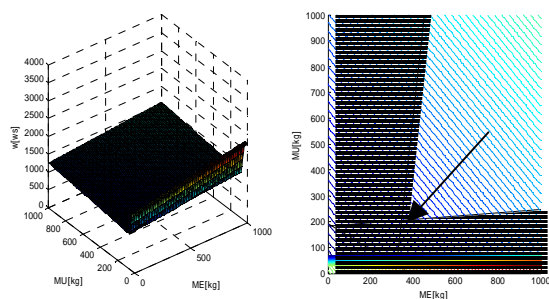


図 4.19(b) 燃費計算結果($M_B=2000.0$ M-AMT)

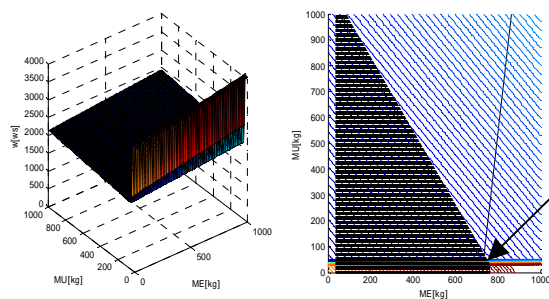


図 4.20(a) 燃費計算結果($M_B=5000.0$ 従来 HEV)

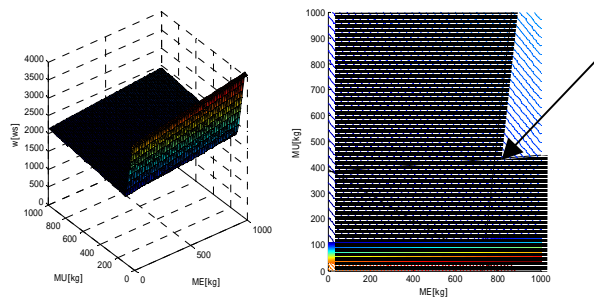


図 4.20(b) 燃費計算結果($M_B=5000.0$ M-AMT)

以上の図から、以下のことが読み取れる。

従来型 HEV の場合、設計条件式(4.21)とエネルギーの条件式(4.32)の交点で設計すると、燃費を一番良く設計することができる。

M-AMT の場合、設計条件式(4.22)の交点で設計すると、燃費を一番良く設計することができる。

そこで、非 HEV 車の燃費 w を w_o 、 の条件における w を w_I 、 の条件における w を w_{II} と置き、それぞれ車体重量 M_B を変数にして車体重量に対するエネルギー効率の比較を行った。結果を図 4.21 に示す。

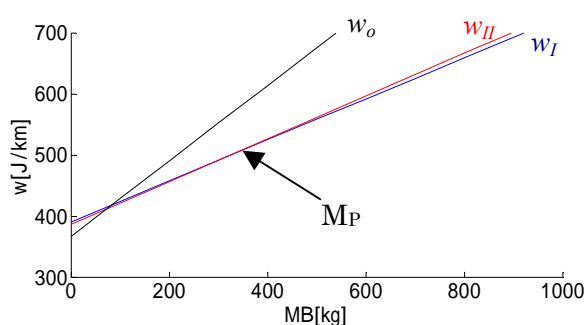


図 4.21 従来型 HEV と M-AMT のエネルギー効率比較

この図から、車体重量 M_B が重い車両の場合は従来型 HEV の燃費である w_I のほうが小さいが、およそ 360[kg] に存在する損得分岐点 M_P を境に w_{II} のほうが小さくなり、この領域においては M-AMT の方がよりよいエネルギー効率の車両を設計できる可能性があるということがわかる。

また、 MM' を変数として、損得分岐点 M_P がどのように変化するかを調査した。結果を図 4.22 に示す。この図から、 MM' を変数大きくしてモータをさらに小さくすることができれば、損得分岐点は大きくなることわかる。

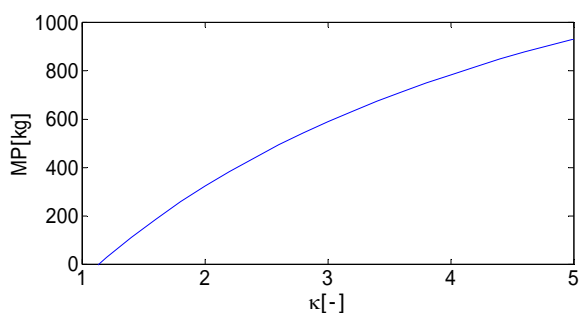


図 4.22 瞬間最大出力比 MM' に対する損得分岐点 M_P の影響

4.6 まとめ

非 HEV 車および従来型 HEV 車、提案する M-AMT 車両のエネルギー効率比較を行うために、走行パターンの定式化を行い、設計制約を重量ベースで図示した上でそれぞれのエネルギー効率を計算し、最適なエンジン・モータユニットの重量配分を決定する方法を提案した。

その結果提案する M-AMT 車両は、360[kg]付近にある損得分岐点 M_p を境として、車体重量が軽い軽車両側において従来型 HEV よりも高いエネルギー効率を示す可能性があるということが示された。

また、瞬間最大出力比 MM' を大きくとることができるならば、その分岐点はさらに大きい値にシフトし、より広範囲な車両に適用可能であるということが示された。

5. トルクと充放電の制御法の検討

キャパシタを用いた M-AMT を実現するには、ドライバの加減速要求に応える駆動力制御と同時に、車速に応じたキャパシタの充放電制御の両立が必要不可欠である。本研究ではこれを簡便かつ精度よく行うために、エンジントルクオブザーバを用いたモータのトルク制御を提案する⁽¹⁾。

まず、計算に必要な物理量を以下のように定義する。

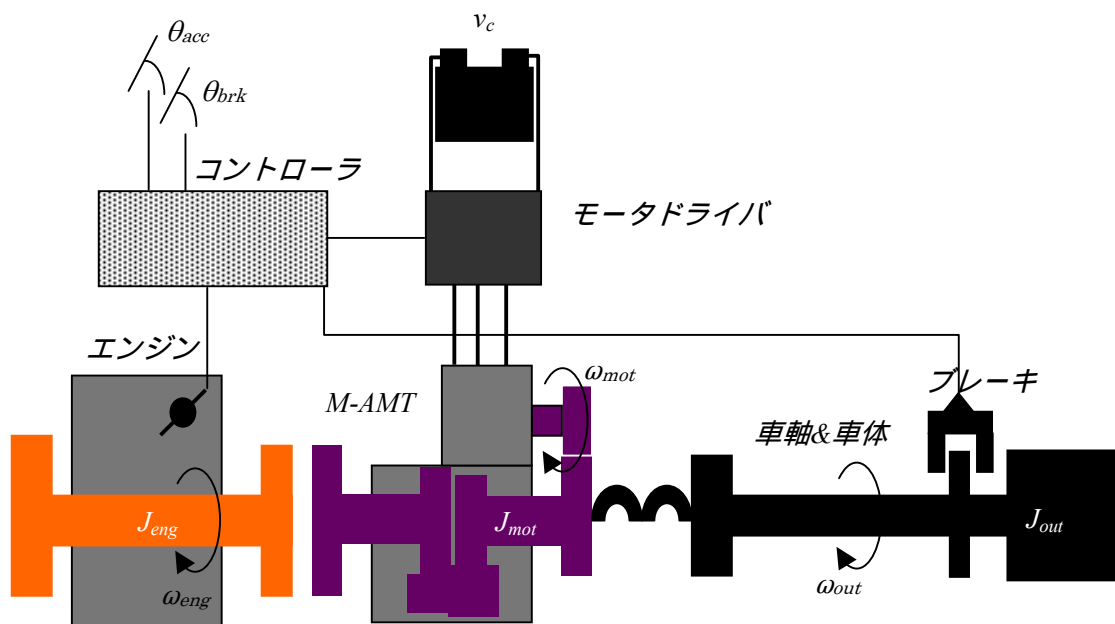


図 5.1 パラメータ模式図

エンジン慣性	: J_{eng}
変速機慣性	: J_{mot}
車軸及び車体等価慣性	: J_{out}
変速機変速比	: $\rho(N)$
N 速ノミナル車体慣性モーメント	: $\hat{J}_{out}(N)$
アクセルペダル踏み込み量	: θ_{acc}
ブレーキペダル踏み込み量	: θ_{brk}
AMT 出力軸回転速度	: ω_{out}
キャパシタ端子間電圧	: v_c

5.1 要求トルクの計算

本制御のトルク目標はおおまかに分けて2つある。ひとつがドライバの加速要求を意味するトルクであり、もうひとつがキャパシタの充放電要求を意味するトルクである。以降それぞれ T_{trg_g} 、 T_{trg_s} と記す。その演算器の構成を図 5.2 に示す。

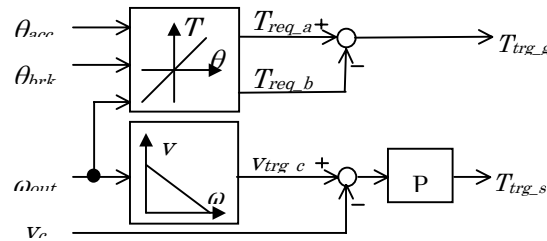


図 5.2 要求トルク演算器

ドライバの要求トルク T_{trg_g} は、まずドライバの踏み込むアクセルの踏み込み量 θ_{acc} 、ブレーキペダル踏み込み量 θ_{brk} と車速 ω_{out} をもとに、ドライバ加速要求トルク T_{req_a} 、ならびにドライバ減速要求トルク T_{req_b} を決めることから演算を始める。これらはドライバの加速要求の大きさを直接表す指標であり、後述するエンジンやブレーキの制御に使用する。これらの指標を用いて T_{trg_g} は(5.1)で決定する。

$$T_{trg_g} = T_{req_a} - T_{req_b} \quad \dots(5.1)$$

一方ストレージ要求トルク T_{trg_s} であるが、まず目標となるストレージ電圧 v_{trg_c} を決定し、実際のストレージ電圧 v_c と比較を行い、PI 制御器を用いて生成する。 v_{trg_c} については、車速にほぼ比例する ω_{out} を入力とする関数とし、図 5.3 のような右下がりの関数を用いて定める。これは以下の2つの要件を果たすためである。

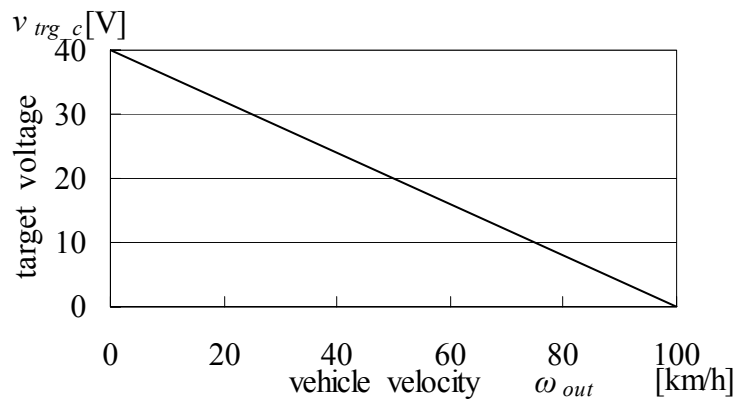


図 5.3 ストレージ目標電圧の設定例

低い車速においては，将来変速が起こる確率が高く，変速に備えてストレージにエネルギーを蓄えておくことが望ましい

高い車速においては，停車するまでに回収することができる回生電力が大きく，ストレージ内のエネルギーを空にしておくことが望ましい

5.2 エンジン・ブレーキの制御

エンジンやブレーキの制御を行うために， T_{req_a} ， T_{req_b} をもとにエンジン向け目標トルク T_{trg_e} ，ブレーキ向け目標トルク T_{trg_b} を生成する。具体的には， N 速における AMT の減速比 $\rho(N)$ を考慮して

(i) $T_{req_b} = 0$ の場合 (ブレーキオフ)

$$\begin{cases} T_{trg_e} = \frac{1}{\rho(N)}(T_{req_a} + T_{req_s}) \\ T_{trg_b} = T_{req_b} (= 0) \end{cases} \quad \dots (5.2)$$

(ii) $T_{req_b} > 0$ の場合 (ブレーキオン)

$$\begin{cases} T_{trg_e} = \frac{1}{\rho(N)}T_{req_a} \\ T_{trg_b} = T_{req_b} - \max(0, \min(T_{req_b}, T_{req_s})) \end{cases} \quad \dots (5.3)$$

という計算をする。このような場合分けを用いるのは，

ブレーキペダルオフ時には機械ブレーキを作動させない

ブレーキペダルオン時にはドライバの要求(= T_{req_b})よりも大きなトルクではモータの回生ブレーキを作動させない

ブレーキペダルオン時にはドライバの要求(= T_{req_a})以上にエンジンを駆動させない

という安全に関する要件を満足させるためである。エンジンやブレーキはこれら T_{trg_a} ， T_{trg_b} に基づきフィードフォワード制御を行う。

5.3 エンジントルクオブザーバによるモータの制御

次に，走行中にモータが補償すべきトルクの大きさを決定するために，外乱オブザーバの考え方を用いたトルク制御を提案する。その構成を図 5.4 に示す。

エンジントルクオブザーバ T_{obs} を，モータの目標トルク T_{trg_m} と車速から得られる加速度情報 $\dot{\omega}_{out}$ に基づき，(5.4)と定義する。

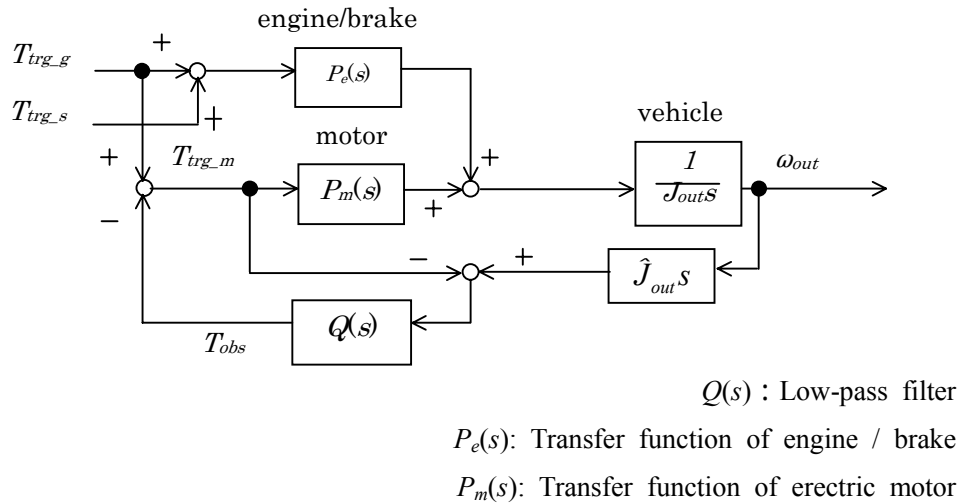


図 5.4 エンジントルクオブザーバの構成

$$T_{obs} = Q(s)(T_{trg_m} - \hat{J}_{out}(N)\dot{\omega}_{out}) \quad \dots(5.4)$$

$Q(s)$ は安定化のためのローパスフィルタである。本研究では最も単純なローパスフィルタとして一次遅れフィルタを採用した(時定数 τ_{LPF})。このようにエンジンオブザーバトルクを定義することは，モータから見てエンジンやブレーキがないものと看做して出力トルクの誤差を推定することを意味する。すなわち，これらの要素がトルクを出力している場合，そのトルクの大きさが T_{obs} の値として推定される。

最終的にモータ目標トルク T_{trg_m} は，(5.1)で決定する車両全体目標トルク T_{trg_g} と，(5.4)で得られる T_{obs} を元に，(5.5)のように定める。

$$T_{trg_m} = T_{trg_g} - T_{obs} \quad \dots(5.5)$$

ただし， T_{obs} の推定自体に T_{trg_m} を用いているため，実際の演算には 1 制御周期前の T_{obs} を使用する。

さて，エンジン，モータのトルク伝達関数をそれぞれ P_e ， P_m とおくと，このときの制御入力である T_{req_g} ， T_{req_s} から加速度 $\dot{\omega}_{out}$ への伝達関数は，(5.6)で与えられる。

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{P_m + (1-Q)P_e}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_g} + \frac{(1-Q)P_e}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_s} \quad \dots(5.6)$$

クラッチが切り離されてエンジンのトルクが遮断されてしまうことを $P_e = 0$ と表現すると、トルク遮断が発生したときの加速度は(5.7)で表される。

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{P_m}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_g} \quad \dots(5.7)$$

$Q(s)$ はローパスフィルタなので定常的には 1 であることを考えると、(5.7)はエンジントルクがクラッチなどにより遮断されたとしても、車体加速度は最終的に車両全体のトルク目標値 T_{trg_g} に追従するというを示している。

また、モータ目標トルク T_{trg_m} は(5.8)で表される。

$$T_{trg_m} = \frac{J_{out} - \hat{J}_{out}QP_e}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_g} - \frac{\hat{J}_{out}QP_e}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_s} \quad \dots(5.8)$$

このことから、(5.6)や(5.7)と同様に考えると、モータの目標トルクはクラッチが締結され $P_e = 1$ とみなせるとき、すなわちクラッチが締結されているときはストレージ要求トルク T_{req_s} に追従し、クラッチが切り離されたときには第 1 項が現れ、結果として車体の駆動力すべてをモータが負担するというを意味している。

これにより、モータ・エンジン・ブレーキの各トルク出力デバイスによる加減速は、トランスミッションの状態にかかわらず車両全体のトルク目標値 T_{trg_g} に追従することがわかる。言い換えるならば、提案する制御を用いることで、クラッチストロークセンサをはじめとする追加のセンサをつけなくても、変速中のトルク遮断を補償することができる。

さらに、(5.6)を変形すると、

$$\dot{\omega}_{out} = \frac{P_m}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} T_{trg_g} + \frac{(1-Q)}{J_{out}(1-Q) + \hat{J}_{out}QP_m} P_e (T_{trg_s} + T_{trg_g}) \quad \dots(5.6)'$$

となる。これは実エンジントルクに相当する $P_e (T_{trg_g} + T_{trg_s})$ の τ_{LPF} より十分大きい周波数成分が、ハイパスフィルタ $(1-Q)$ によりカットされて車体加速度には伝わらないことを示唆している。

一般にレシプロエンジンに代表される自動車向けの内燃機関の出力は、その回転速度の1/2 乗に比例した低周波数の強いトルク振動を有する。しかし、本制御を常時作動させておくことにより、エンジンのトルク振動に起因する車体の揺れもモータトルクによって抑制できると期待される。

6. シミュレーション試験

提案するトルク制御及び充放電制御の効果を検討するために、本システムを軽量コンピュータに搭載することを想定し、Simulink を用いたシミュレーションモデルを構築して、模擬試験を行った^()。

6.1 車両モデル

M-AMT の解析においては、変速中である場合とない場合の間で駆動トルクや慣性モーメントなどの運動状態が明確に分かれるため、場合分けを用いたダイナミクス解析を行う。 J_{eng} , J_{drv} , J_{out} はそれぞれエンジン、トランスミッション及びモータ、タイヤ及びその他車体の等価慣性モーメントである。また、トランスミッションと車体駆動軸の間にはゴムダンパのような緩衝器が取り付けられており、二者の速度差や位相差に応じてトルクを伝達するものとして模擬する。

(i) 変速中である場合...直進方向のみを考え、簡単のためタイヤと路面間の滑りはないものとする。このとき車軸、出力軸はそれぞれ独立に回転するので、運動方程式は(6.1)で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{eng} \\ \dot{\omega}_{drv} \\ \dot{\omega}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/J_{eng} & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_{drv} & 0 \\ 0 & 0 & 1/J_{out} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{eng} \\ T_{mot} - T_{drv} \\ T_{drv} - T_{frc} \end{pmatrix} \quad \dots(6.1)$$

ω_{out} , ω_{drv} , ω_{eng} はそれぞれ車軸、トランスミッション出力軸、エンジンの回転速度を表し、 T_{eng} , T_{drv} , T_{frc} , T_{mot} はそれぞれエンジントルク、トランスミッション伝達動力(=ダンパ反力)、走行抵抗、モータトルクを表す。

(ii) 変速中でない場合...変速中でない場合はエンジンと変速機の出力軸はクラッチにより剛に結合されるので、エンジンの慣性 J_{eng} とトランスミッションの慣性 J_{drv} をまとめて一つの等価慣性とみなすことが可能である。したがって運動方程式は変速機 N 段ギアにおける減速比 $\rho(N)$ を用いて以下のように記述することができる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_{drv} \\ \dot{\omega}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/(J_{eng} / \rho(N)^2 + J_{drv}) & 0 \\ 0 & 1/J_{out} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho(N)T_{eng} + T_{mot} - T_{drv} \\ T_{drv} - T_{frc} \end{pmatrix} \quad \dots(6.2)$$

エンジントルクの計算に必要なエンジン回転速度 ω_{eng} は, (6.3)で得る。

$$\omega_{eng} = \rho(N) \cdot \omega_{out} \quad \dots(6.3)$$

6.2 電気回路モデル⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

モータには円筒型の永久磁石同期モータを使うこと想定してモデル化を行う。このとき, d 軸および q 軸から見た回路方程式を立てると, (6.4)が成り立つことが知られている。

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_M & -\omega_{drv} \\ \omega_{drv} & -r_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q - \omega_{out} \Phi_0 \end{pmatrix} \quad \dots(6.4)$$

ただし, i_d, i_q : d,q 軸電流

v_d, v_q : d,q 軸電圧

r_M : 電気子巻線抵抗

L : 巻線インダクタンス

Φ_0 : トルク定数

さらに, 電力損失のない理想的なインバータを仮定すると, 電源から放出するエネルギーとモータが消費するエネルギーが等しくなければならないことから, (6.5)が成立する。

$$v_c \dot{i}_c - r_c i_c^2 = v_d i_d + v_q i_q \quad \dots(6.5)$$

ただし, i_c : 電源電流

v_c : 電源電圧

r_c : ストレージ内部抵抗

電源にはキャパシタを使用することを考えているため, ストレージ電圧 v_c のダイナミクスは i_d, i_q, v_c を用いて(6.6)の形で表現することができる。

$$\dot{v}_c = \frac{i_c}{C} = \frac{v_c - \sqrt{v_c^2 - 4r_c(v_d i_d + v_q i_q)}}{2r_c C} \quad \dots(6.6)$$

最終的にキャパシタに充電/放電されるエネルギーを算出することが本研究の目的のひとつであるため, 今回のシミュレーションモデルでは, 物理モデルである(6.1), (6.2), (6.3)の微分方程式と平行して, (6.4)および(6.6)の回路モデルも同時に演算する。

6.3 機械要素モデル

自動車に一般的に使用されるレシプロエンジンは、典型的な間欠的トルク発生デバイスであり、またトルク応答もモータに比べてはるかに遅い。そのため、より現実に近づけるためそれらを模擬したモデルを設計する。

まず、シミュレータ内で模擬されている仮想スロットル開度 θ_{thr} とダイナミクスから得られるエンジン回転速度 ω_{eng} を引数とした二次元マップを補間することにより、一旦ノミナルエンジントルク T_{eng} を求める。このノミナルエンジントルクを基準にして、本模擬試験では(6.7)のように、一次遅れと無駄時間、三角関数を用いて実エンジントルク T_{eng} をモデル化した。

$$T_{eng} = \frac{e^{-s\tau_{0eng}} \bar{T}_{eng}}{1 + s\tau_{1eng}} \begin{cases} (1 + \sin\theta_{eng}) & (0 \leq \theta_{eng} < 2\pi) \\ 1 & (2\pi \leq \theta_{eng} < 4\pi) \end{cases} \quad \dots(6.7)$$

ただし、 θ_{eng} : エンジン回転角度(位相)

τ_{0eng} : エンジン無駄時間時定数

τ_{1eng} : エンジン一次遅れ時定数

図 6.1 にエンジントルクの模擬波形の例を示す。

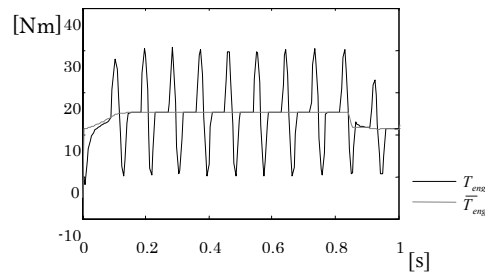


図 6.1 エンジントルク模擬波形例

ブレーキも同様に、油圧指令に対する油圧応答の遅れを考慮して、無駄時間要素と一次遅れ要素を組み込む。ノミナルブレーキトルク T_{brk} と実ブレーキトルク T_{brk} の関係は(6.8)で表される。

$$T_{brk} = \frac{e^{-s\tau_{0brk}} \bar{T}_{brk}}{1 + s\tau_{1brk}} \quad \dots(6.8)$$

τ_{0brk} : ブレーキ無駄時間時定数

τ_{1brk} : ブレーキ一次遅れ時定数

本シミュレーションでは M-AMT 出力軸と車体駆動軸はゴムブッシュのような粘弾性要素で結合されていると仮定している。従って、トランスミッションおよび車体駆動軸に伝達するトルク T_{drv} は、 ω_{out} 、 ω_{drv} 、 θ_{out} 、 θ_{drv} を用いて(6.9)で与えられる。

$$T_{drv} = K_{drv}(\theta_{out} - \theta_{drv}) + D_{drv}(\omega_{out} - \omega_{drv}) \quad \dots(6.9)$$

ただし、 K_{drv} ：ダンパ剛性

D_{drv} ：ダンパ粘性

さらに、自動車は一般に空気抵抗や機械的摩擦など、車速に応じた抵抗を受けるが、ここでは車速の代わりに ω_{out} の関数として摩擦トルク T_{frc} を出力するモデルを用いる。

同期モータの出力トルク T_{mot} は以下の形で与えられる。

$$T_{mot} = \Phi_0 i_q \quad \dots(6.10)$$

6.4 シミュレーション結果

表 6.1 にシミュレーションモデルに使用した定数を示す。本定数は 7 章で詳述する実験車の諸元に基づき設定されている。

表 6.1 シミュレーション条件

max engine power	5.5[kW]	contoroller periodic time	0.001[s]
weight	565[kg]	K_{drv}	1500[Nm/rad]
tire radius	0.235 [m]	D_{drv}	10[Nm/(rad/s)]
τ_{LPF}	0.01[s]	r_c	0.1[]
τ_{0eng}	0.005[s]	r_m	0.14[]
τ_{1eng}	0.01[s]	L_m	0.37[mH]
τ_{0brk}	0.05[s]	C	25[F]
τ_{1brk}	0.1[s]	0	0.07[Wb]

図 6.2～図 6.4 に、パワーアシストを行った場合と行わなかった場合の加速走行の模擬波形を示す。図 6.2 はパワーアシストを行わなかった場合、図 6.3 及び図 6.4 はパワーアシストを行った場合の、同一アクセル開度で加速中の車体加速度及びエンジン回転速度・車両速度のグラフである。図 6.3 と図 6.4 は、シミュレーション開始時の電気二重層キャパシタ初期チャージが異なる。図 6.3 は初期チャージ 20[V](目標電圧に対し充電不足のケース)、図 6.4 は 40[V](充電過多のケース)の走行をそれぞれ模擬している。

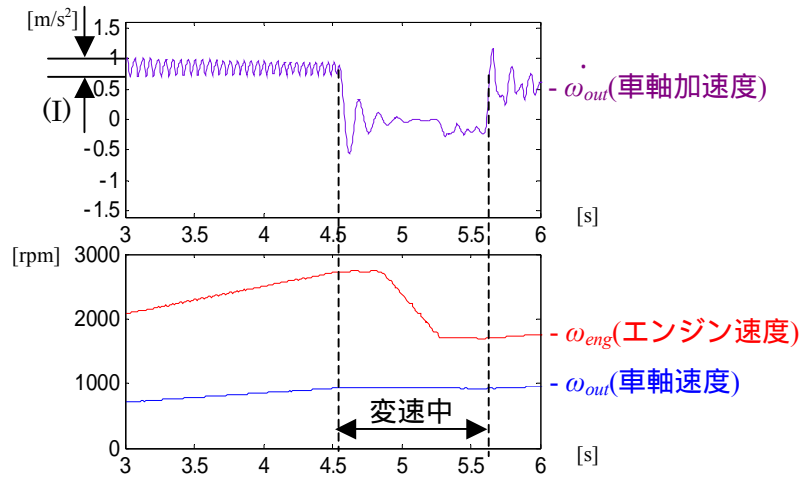


図 6.2 加速走行シミュレーション結果(アシストなし)

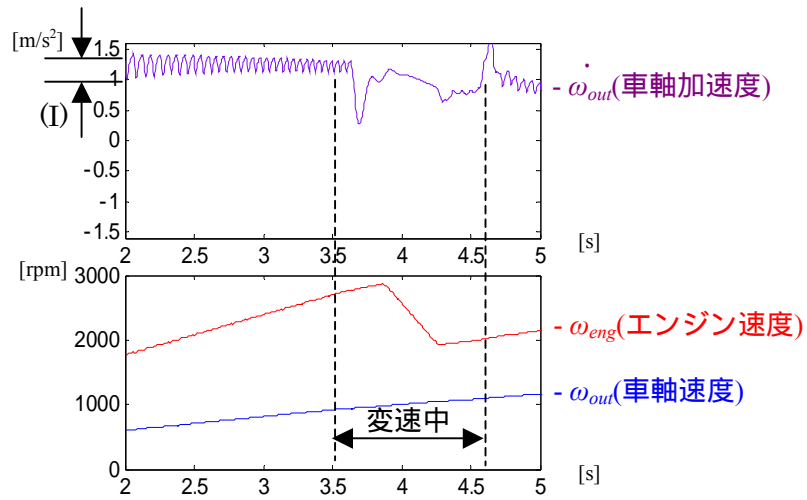


図 6.3 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 20[V])

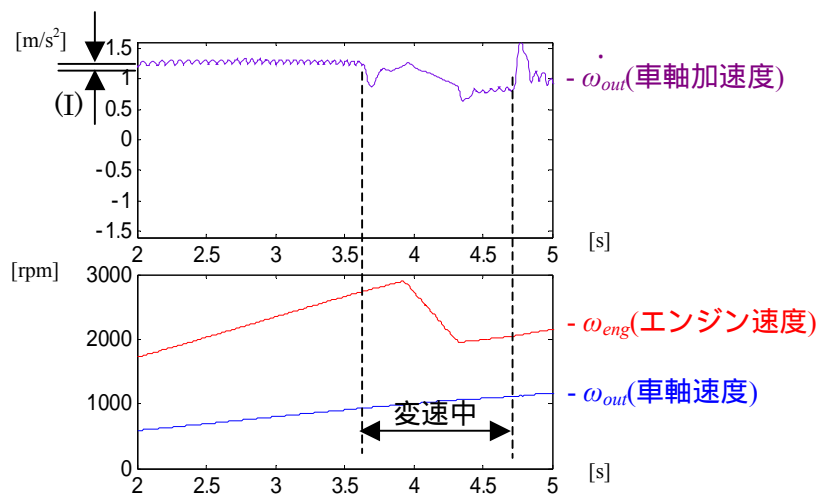


図 6.4 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 40[V])

図 6.2 と図 6.3 および図 6.4 を比較すればわかるように、アシストがない従来の AMT を模擬した図 6.2 のケースでは、変速中に車体加速度が 0 になり、加速抜けが発生して連続した加速が得られなくなっているのに対し、アシストありを模擬した図 6.3 および図 6.4 のケースでは加速抜けが発生せず連続的な加速が獲られていることがわかる。これはモータのアシストトルクが適切に制御されているためである。

次に図 6.3 の初期チャージが低い 20[V]のケースに対応するエンジントルク・モータトルク波形を図 6.5、キャパシタ電流・キャパシタ電圧波形を図 6.6 に、図 6.4 の初期チャージが高い 40[V]のケースに対応するエンジントルク・モータトルク波形を図 6.8、キャパシタ電流・キャパシタ電圧波形を図 6.9 に示す。この二つの条件による違いは、エンジンとモータのトルク分担比に現れる。図 6.5 におけるエンジントルクは、変速前と変速後において、ほぼ同じ大きさのトルクを出力を負擔し、モータトルクも変速前後で変わらずほぼ 20[Nm]のトルクを負擔しているのに対し、図 6.7 の場合は変速前のモータトルクが 60[Nm]もの値を負擔しているのに対し、エンジントルクの負擔はほぼ 5[Nm]程度となっている。

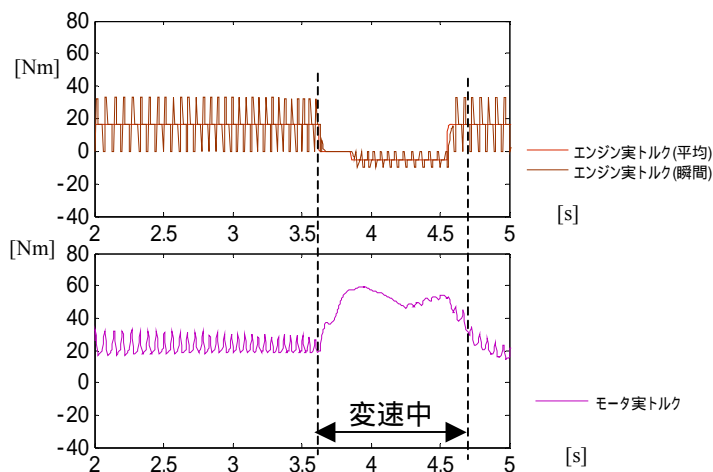


図 6.5 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 20[V])

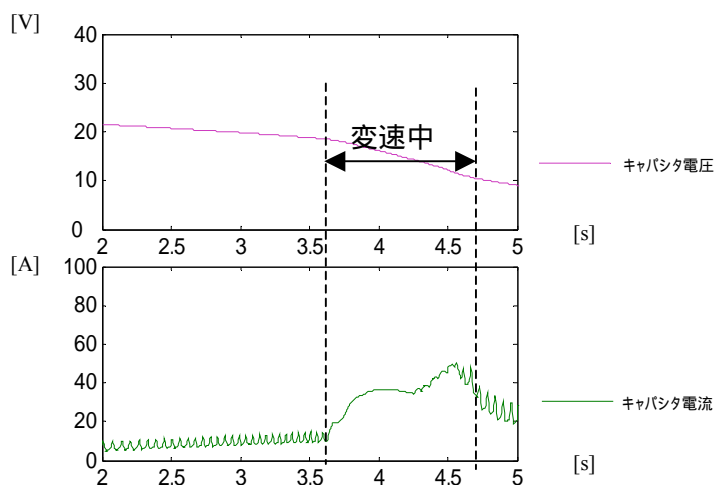


図 6.6 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 20[V])

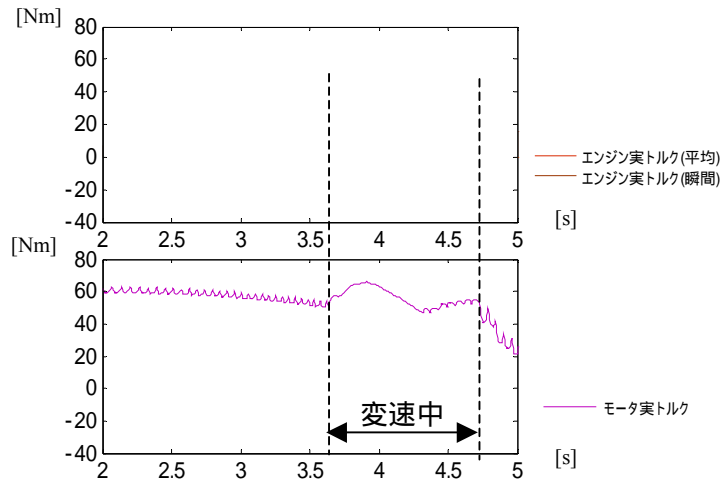


図 6.7 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 40[V])

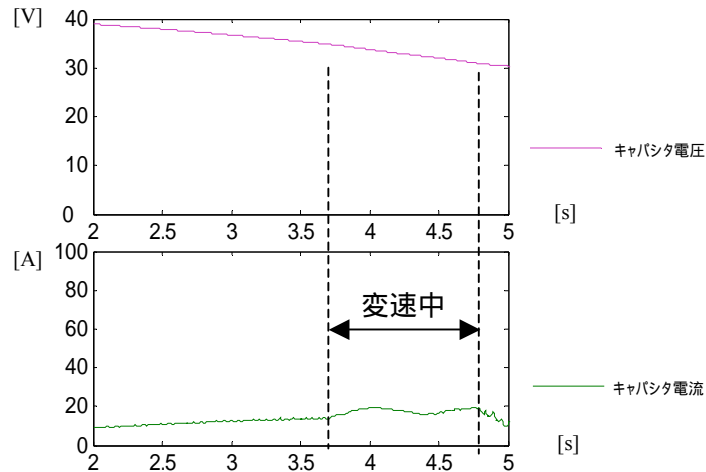


図 6.8 加速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 40[V])

これは初期チャージが目標電圧より大きかったため、キャパシタ電圧を目標電圧に漸近させようという制御が働き、モータのトルク負担比が上がるためである。

またそれだけでなく、車体の振動を意味する加速度の振幅(図中(I)部)も、図 6.2 では約 $0.26[m/s^2]$ であるのに対し、本システムと制御を適用することで、図 6.4 では約 $0.19[m/s^2]$ と、27[%]程度小さくなっている。これは、3 章で説明したように、変速中でない間もエンジントルクオブザーバに基づくモータのトルクアシストを行うことにより、エンジンのトルク振動もモータが補償するためである。

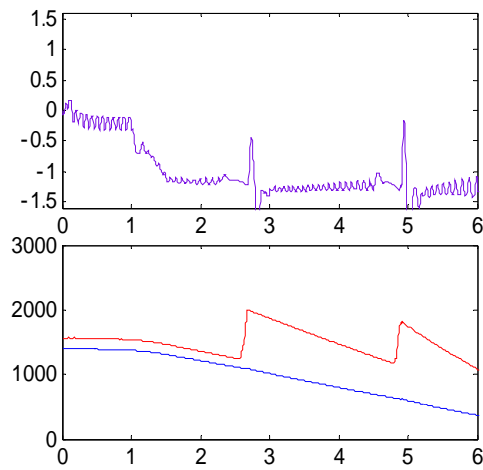


図 6.9 減速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 10[V])

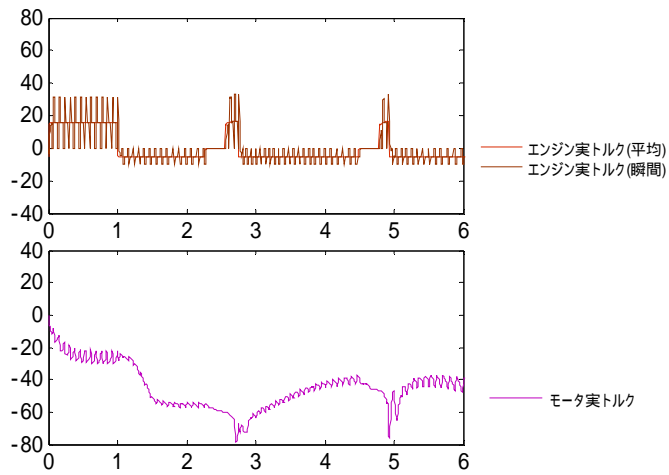


図 6.10 減速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 10[V])

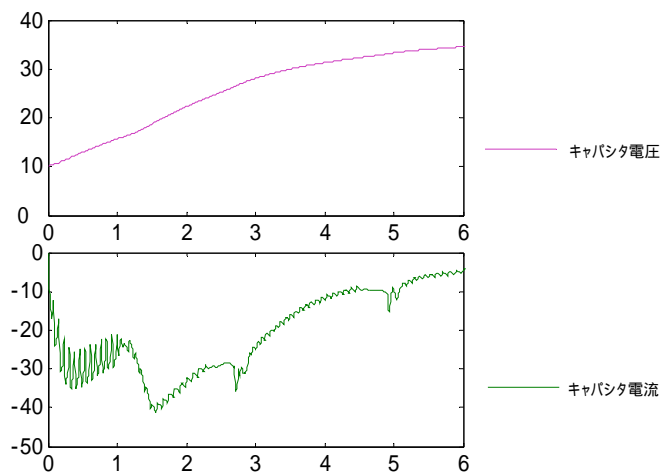


図 6.11 減速走行シミュレーション結果(アシストあり・初期チャージ 10[V])

図 6.9 および図 6.10 , 図 6.11 は、初期チャージ 10[V]、車速 30[km/h]の状態からパワーアシストを行いながら加速度 $-1.2[m/s^2]$ を目標とした減速を行い、エネルギー回生を行った場合の模擬波形である。減速する場合においては、エンジンは基本的にスロットルが閉じられエンジンのトルクはほぼ 0 となるため、加速時のような大きなトルク抜けは発生しない。しかしながら、クラッチが締結・開放されたときにエンジンによる減速力、いわゆるエンジンブレーキ力が遮断されるため、不連続な減速が生じることは変わらない。図 6.10 のモータトルク波形を見ると、減速開始時点から $-60[Nm]$ のモータトルクを発生してエネルギー回生を行いながらも、変速中のエンジンブレーキトルクが抜けるところでは大きな減速力を発生してエンジンブレーキの補償を行い、加速度 $-1.2[m/s^2]$ を維持するよう制御が働いていることがわかる。図 6.11 からは、回生電流によりキャパシタにエネルギーが蓄えられ、車両が停車状態に近づくに従って、停車時の目標ストレージ電圧(30[V])に向けて漸近することがわかる。

このように、提案する制御手法を M-AMT に当てはめることで、変速中のトルク抜けによる不連続な加速を補償するだけでなく、エネルギーストレージの充放電制御も適切に行うことができるということが確認された。

7. 実車試験

電気二重層キャパシタにより駆動される M-AMT を搭載した軽車両を製作し、シミュレーションで計算した諸元で実際に走行可能であるかどうか試験を行った。

7.1 実験車両の構成

ベース車両にはインド LOVSON 製のオート 3 輪車「RICKY」を用いた。その外観を図 7.1 に、代表的な諸元を表 7.1 に示す⁽¹⁹⁾。



図 7.1 実験車両外観

表 7.1 実験車両諸元

全幅	1.120[m]
全長	2.800[m]
全高	1.885[m]
タイヤ径	0.235[m]
空車重量	480[kg]
エンジン排気量	0.395[l]
気筒数	1(単気筒)
エンジン最大出力	7.5[HP]
エンジン最大トルク	17[Nm]
トランスミッションギア比	1st 5:1 2nd 2.93:1 3rd 1.84:1 4th 1.12:1 Final 4.125:1
発進要素	湿式多板クラッチ

この車両のマニュアルトランスミッション部後軸に永久磁石式同期モータを取り付けて、ベルト&プーリを介して駆動する(図 7.2)。

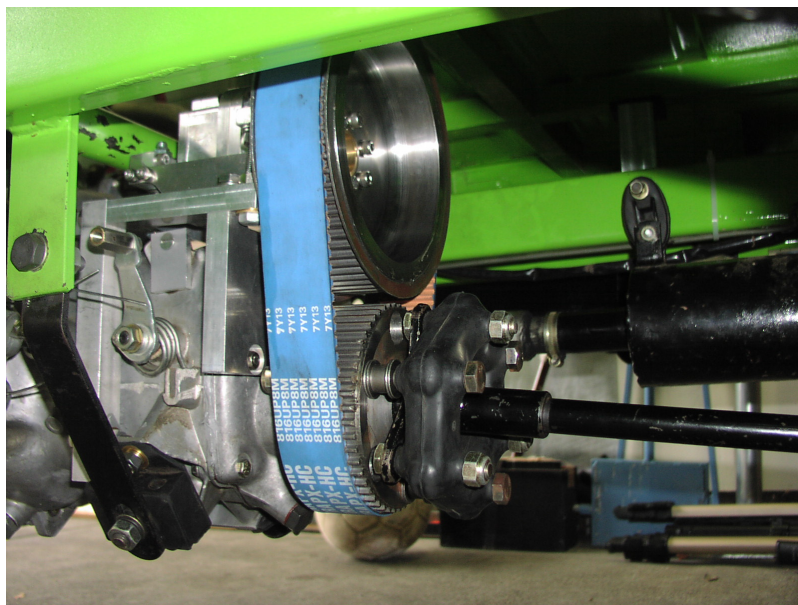


図 7.2 トランスミッション&アシスト用モータ駆動部外観

モータはドライバを介して電気二重層キャパシタに接続され、キャパシタにより駆動する。エネルギーストレージとしては電圧 15V-容量 200F の日清紡製「N'sCAP」を 2 直列/2 並列に結線し、30[V]/200[F]の組キャパシタとして搭載した(図 7.3)。



図 7.3 エネルギーストレージ部(電気二重層キャパシタ)外観

制御コントローラには ART-LINUX を OS とする PC を用いた。ベース車のアクセルレバーに取り付けたポテンショメータを用いてドライバの加速意図を電圧として読み取り、シリアル通信を用いてモータドライバに加速度指令を与えている。また、駆動モータのエンコーダ情報をパルスカウンタにを用いて読み取ることで、車両の速度を計測している。また、エンジンのスロットル部にサーボモータを取り付け、スロットルもこの PC を用いて制御できるように改造した。コントローラの外観を図 7.4 に、システム構成を図 7.5 に示す。



図 7.4 制御用コントローラ外観

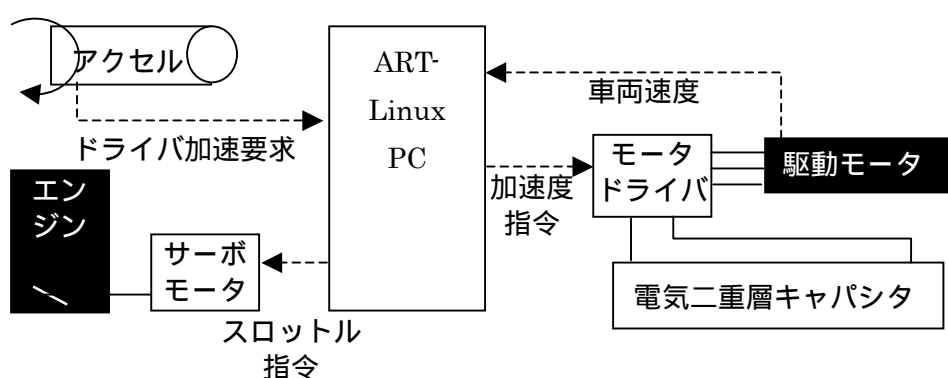


図 7.5 実験車両制御構成

なお、本来「AMT」の実験である以上、変速機も自動化すべきところではあるが、手動で変速しても加速度抜け緩和制御には本質的に差がないため、変速機の自動化は見送り、本実験では、発進や変速は運転者が手動によりクラッチやシフトレバーを操作した。

7.2 実験条件

まず電気二重層キャパシタに初期チャージとして外部から充電を施し、30[V]の状態にした。その上で、0[km/h]からの発進加速および手動変速を行い、モータアシストの有無で車両の挙動がどう変化するかを計測した。

ただし、5章で提案したキャパシタの端子間電圧をモニタリングしながら充放電を制御する手法は今回は評価を見送り、アクセル要求に比例した加速度指令をドライバに送ることで、走行実現性の評価に限った実験を行った。

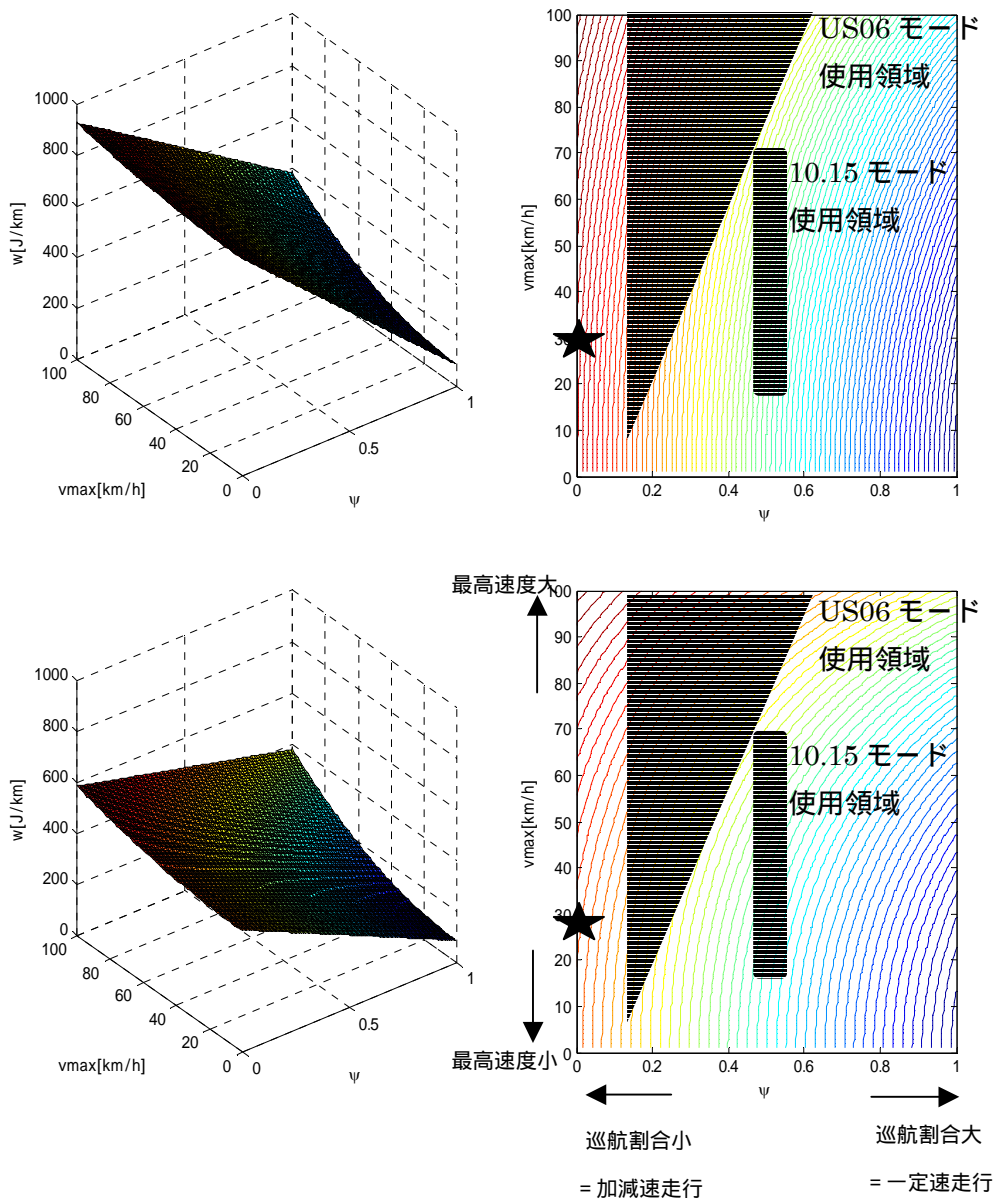


図 7.6 実験条件の S パラメータ表記と理論燃費 (上: モータアシストあり/下: モータアシストなし)

今回の実験は、4章の走行パターンで表現するなら S(30[km/h], 3[m/s²], 0[-])に相当し、図 7.6 の 記号で指示されている点の実験を行うことに相当する。燃費の計測は今回は行わなかったのでデータはないが、適切なエネルギー制御が行われれば燃費が 858[J/km] 484[J/km]と 50%ほどの改善が見込まれる条件である。

7.3 実験結果

モータアシストを行わなかった場合の実験結果を図 7.7 に、行った場合の実験結果を図 7.8 に示す。図中(I)で示しているのは、変速時に発生する加速度の変動である。速度条件が大きく異なるので一概に比較はできないが、図 7.7 に比較し図 7.8 のそれは小さく、モータアシストにより、変速による加速度変動を緩和することができたということが確認された。

また図中(II)に示すのは変速していない間、すなわち定常加速中の加速度変動である。エンジンのトルクの間欠性に伴う振動は、本実験車両の場合 2~3[Hz]のところであり、図 7.6 では 3[Hz]程度の加速度の大きな脈動が計測されているのに対し、図 7.7 のそれは小さく抑えられていることが確認された。これは変速が発生していない間も加速度制御を維持しているために、モータが脈動を打ち消す方向にトルクを出しているからである。図 7.9 はモータアシストがある場合とない場合における加速度波形のフーリエ変換を行い、加速度振動の周波数特性を解析したグラフである。3[Hz]周辺の振動が抑制されていることがこの図からも裏付けられた。これらの結果から、5章で述べた防振効果を実験車両により確かめることができた。

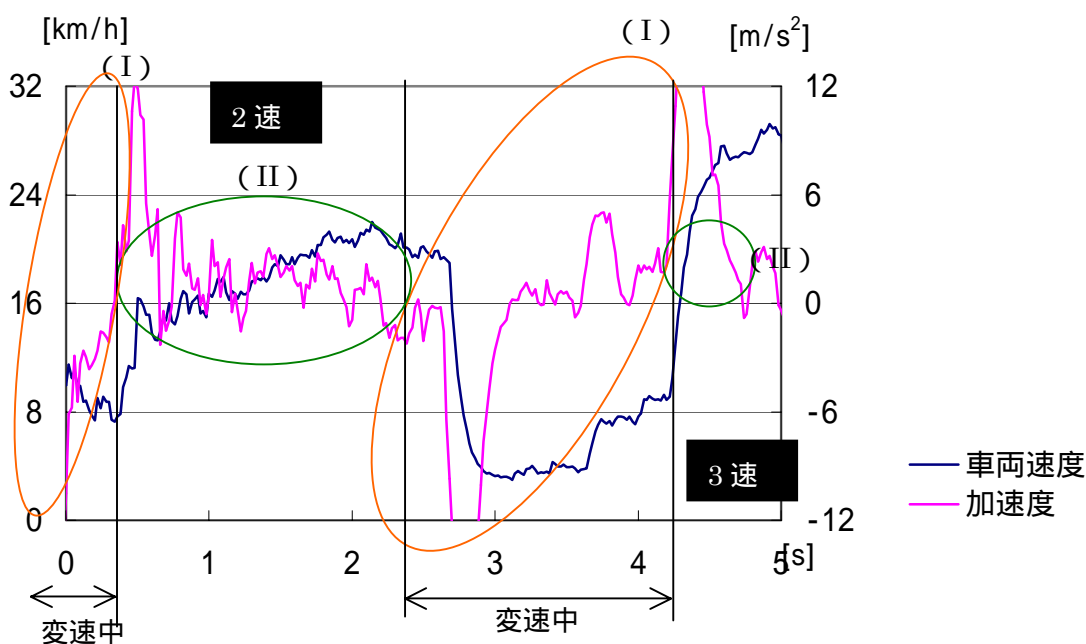


図 7.7 定常加速走行実験結果 (モータアシストなし)

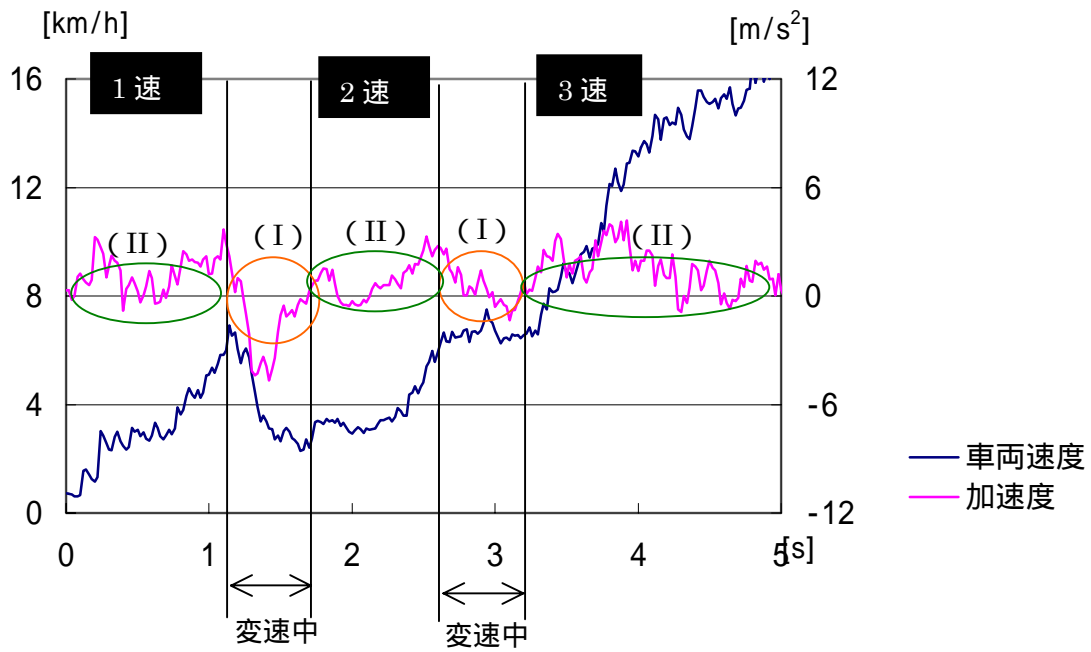


図 7.8 定常加速走行実験結果(モータアシストあり)

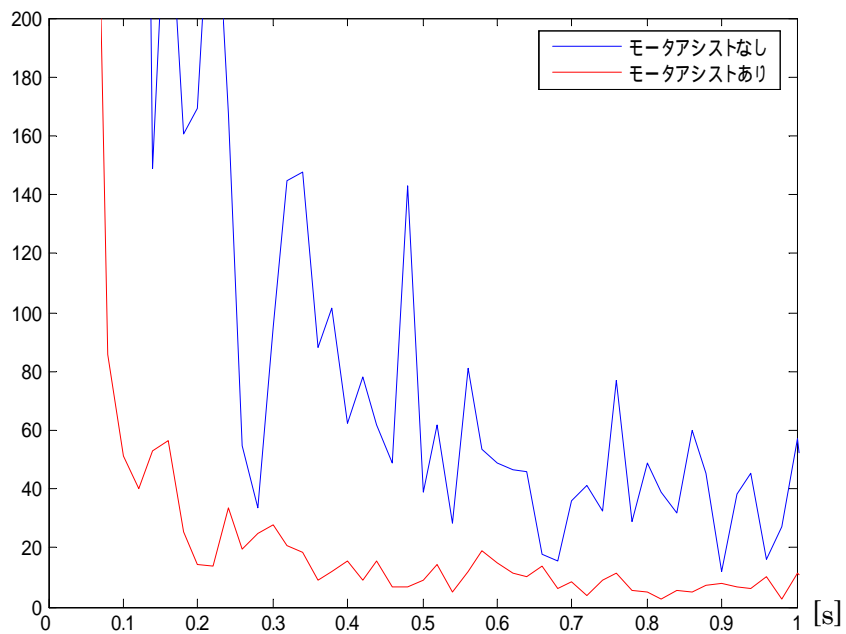


図 7.9 定常加速走行実験結果(モータアシストあり)

8. 結論

本研究では、主に車重が 500kg を下回るような軽車両のエネルギー効率改善法のひとつとして、AMT と呼ばれる自動変速機とキャパシタの組み合わせによるハイブリッド車両を提案し、その成立性と制御方法に対して検討を行った。

ハイブリッドシステムの設計問題を、車両重量に着目したモータ・エンジンの最適配分問題として捉え、エンジンやモータによる重量増を加味したエネルギー分析を行った。その結果、特に 360kg を下回るような軽車両に対して、M-AMT と電気二重層キャパシタの組み合わせは車両のエネルギー効率改善に効果的であるということを解析的に示した。

車両の駆動力制御と電気二重層キャパシタの充放電を同時に行う方法として、エンジントルクオブザーバに基づくコントローラを提案し、追加センサを用いずにモータアシスト AMT を実現する手法の設計を行った。また、その制御が変速中の加速度変動抑制だけでなく、通常走行中の車体の制振にも効果があるということを提示した。

Matlab/Simulink を用いたシミュレーションプログラムを作成し、提案した M-AMT と制御手法で車両として成立するか検討を行った。現在あるキャパシタやモータの組み合わせで十分成立可能であることを示した。

インドで実際に走行しているオート 3 輪車をベースに M-AMT を搭載した実験車両を製作し、走行試験を行った。電気二重層キャパシタと M-AMT の組み合わせで変速中の加速度変動を抑制することができ、トルク振動の抑制にも効果的であることを実験により裏付けることができた。

A. 付録1 シミュレーションプログラム概要

ここでは6章で説明したプログラムを取り上げ、その中身を詳述する。

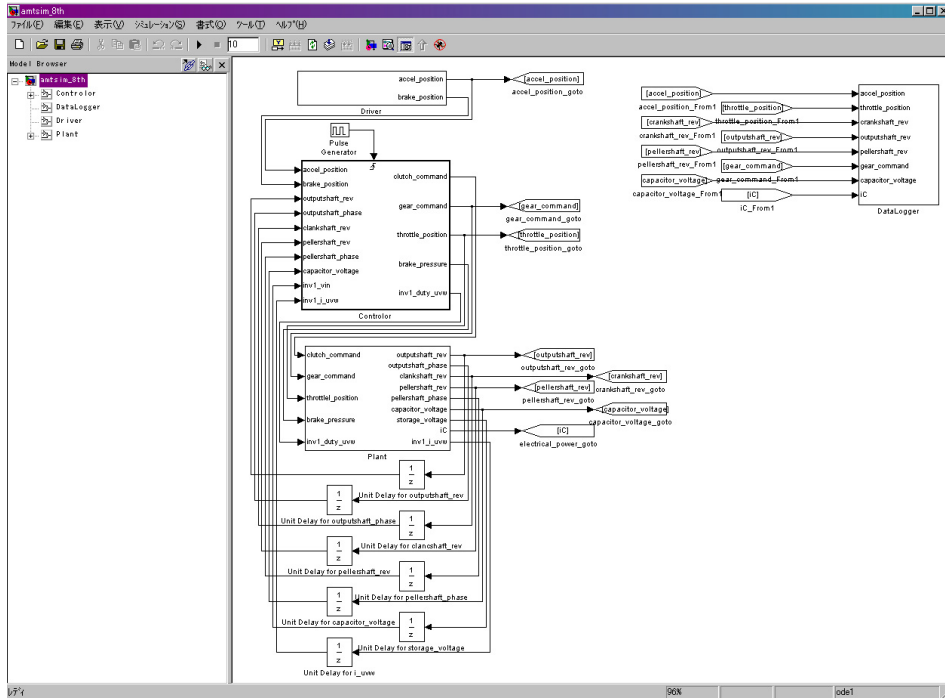


図 A.1 シミュレーションプログラム(全体図)

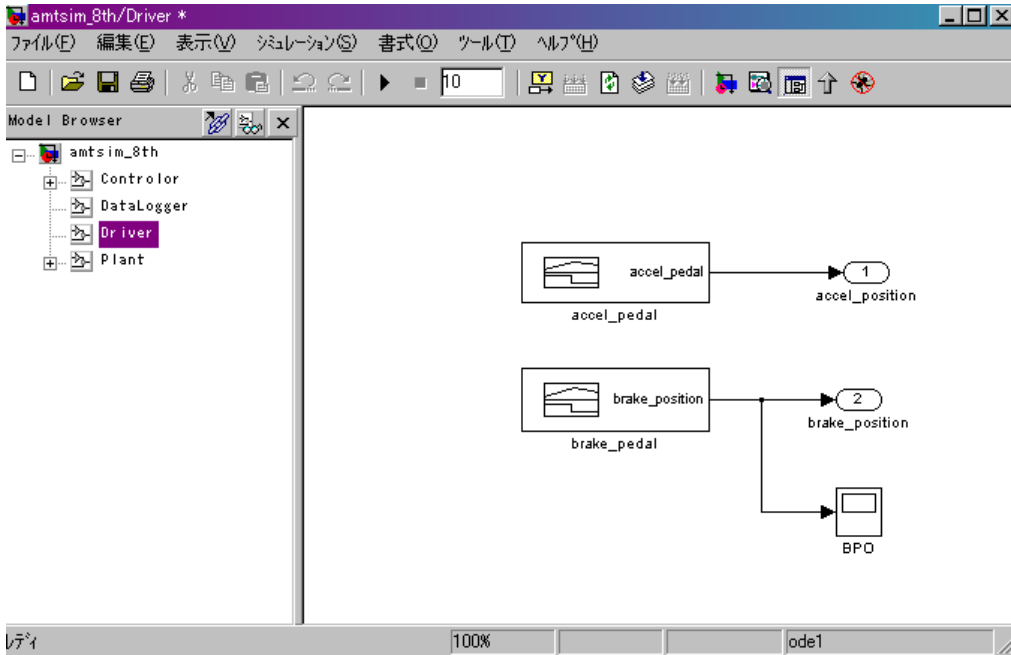


図 A.2 シミュレーションプログラム(ドライバモデル)

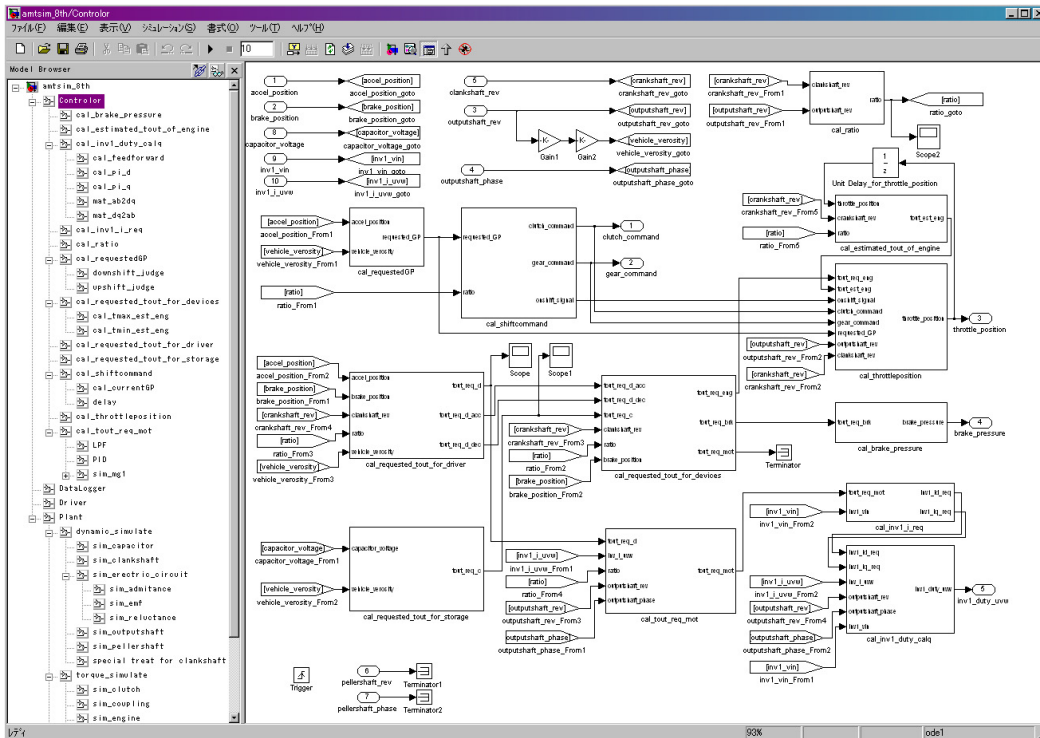


図 A.3 シミュレーションプログラム(コントローラモデル)

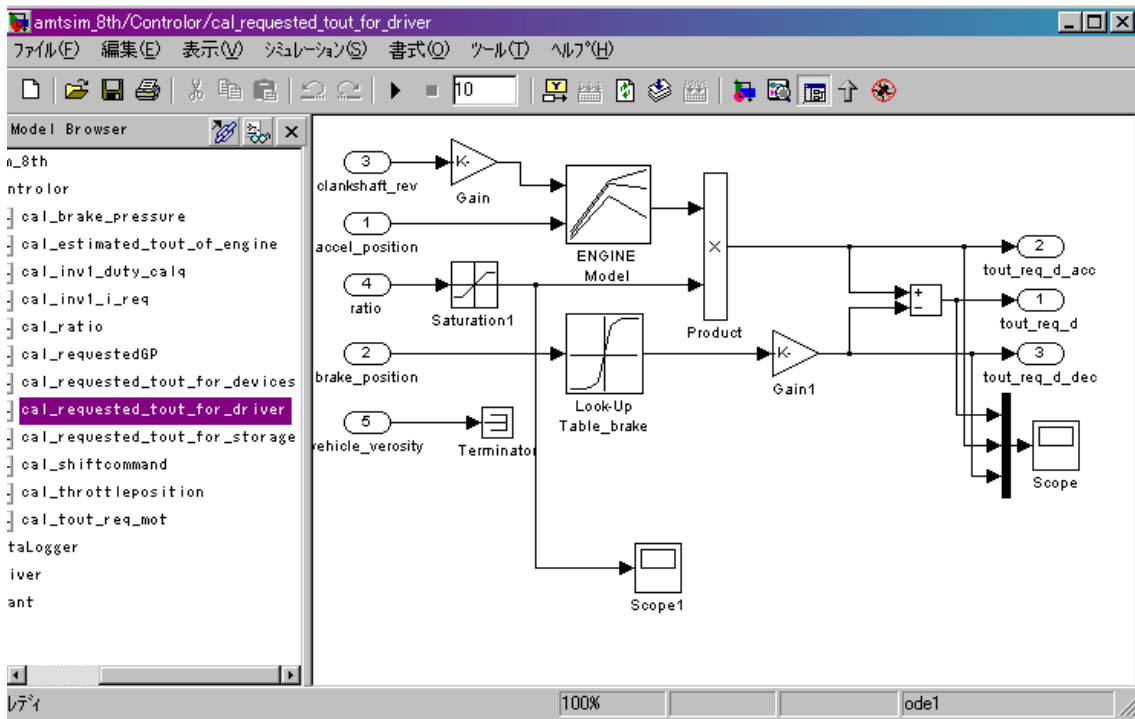


図 A.4 シミュレーションプログラム(ドライバトルク要求決定部)

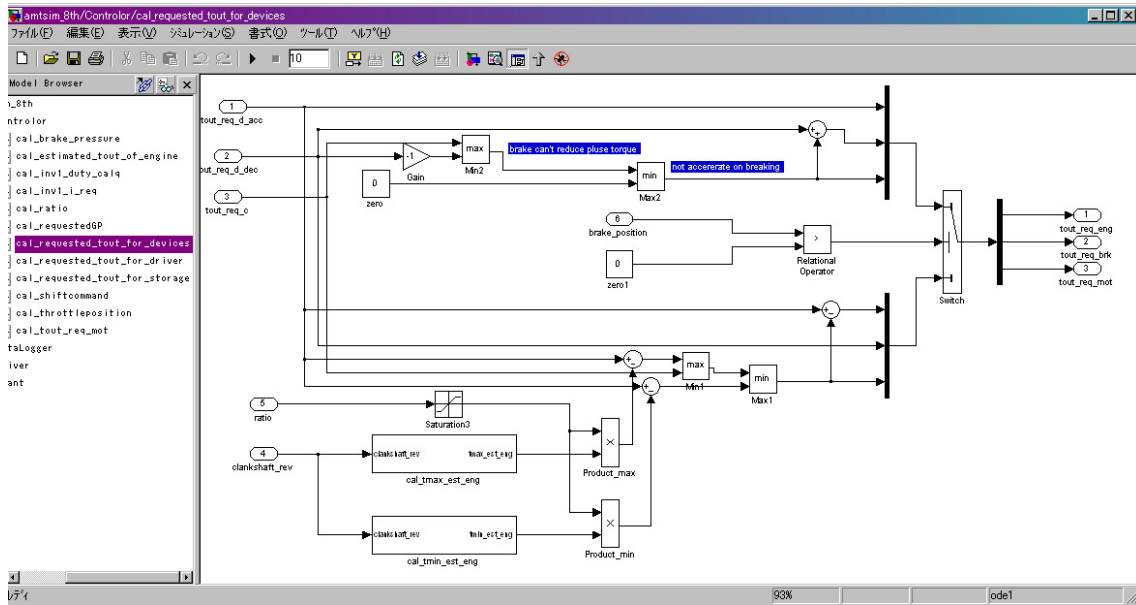


図 A.5 シミュレーションプログラム(トルク制限部)

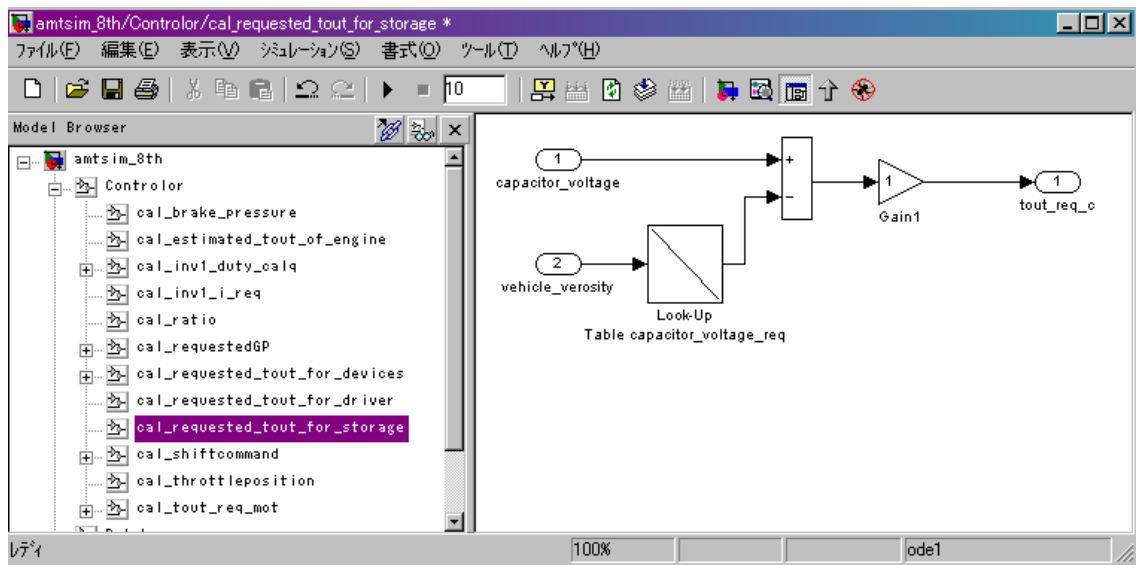


図 A.6 シミュレーションプログラム(キャパシタ目標トルク生成部)

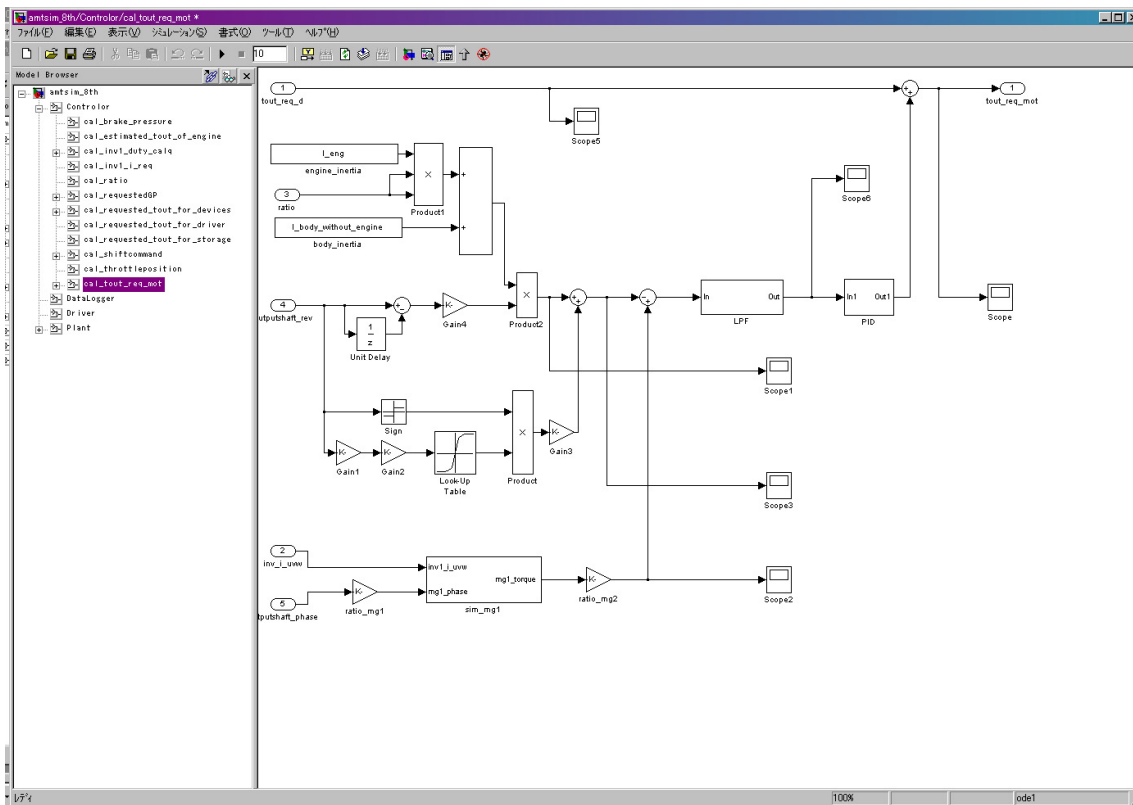


図 A.7 シミュレーションプログラム(エンジントルクオブザーバ部)

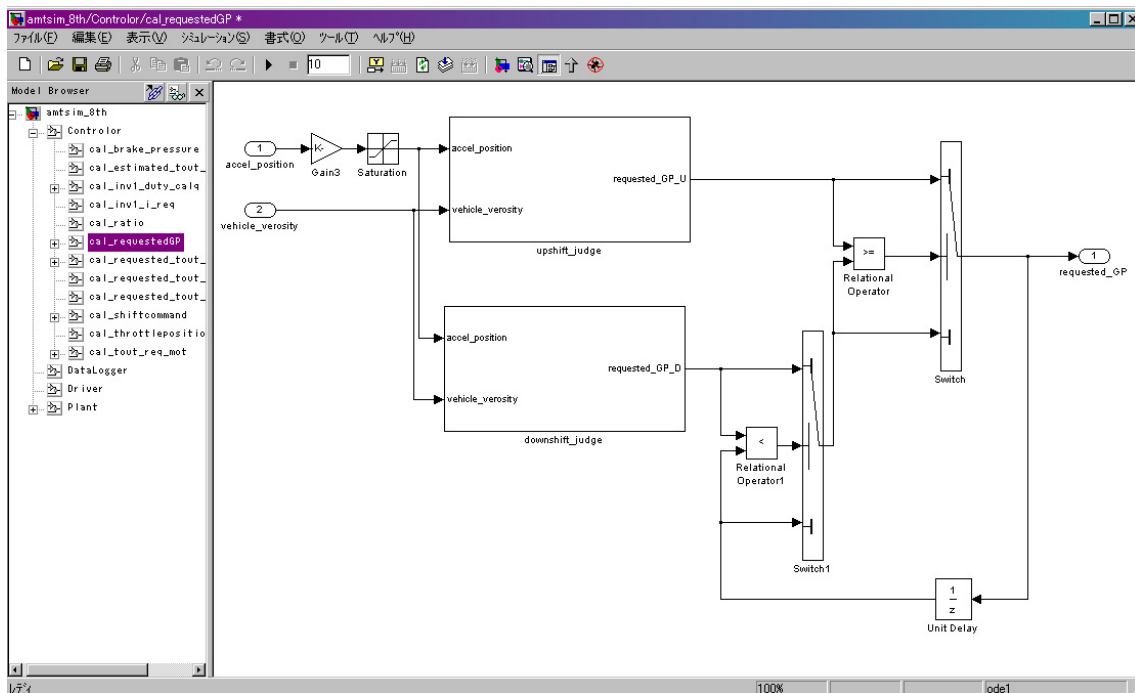


図 A.8 シミュレーションプログラム(シフト決定部)

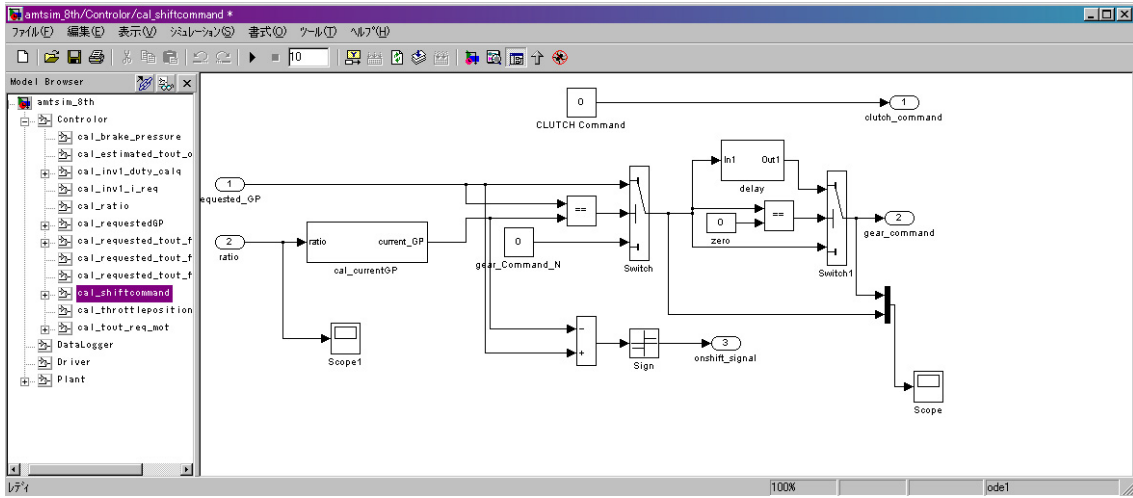


図 A.9 シミュレーションプログラム(シフト実現部)

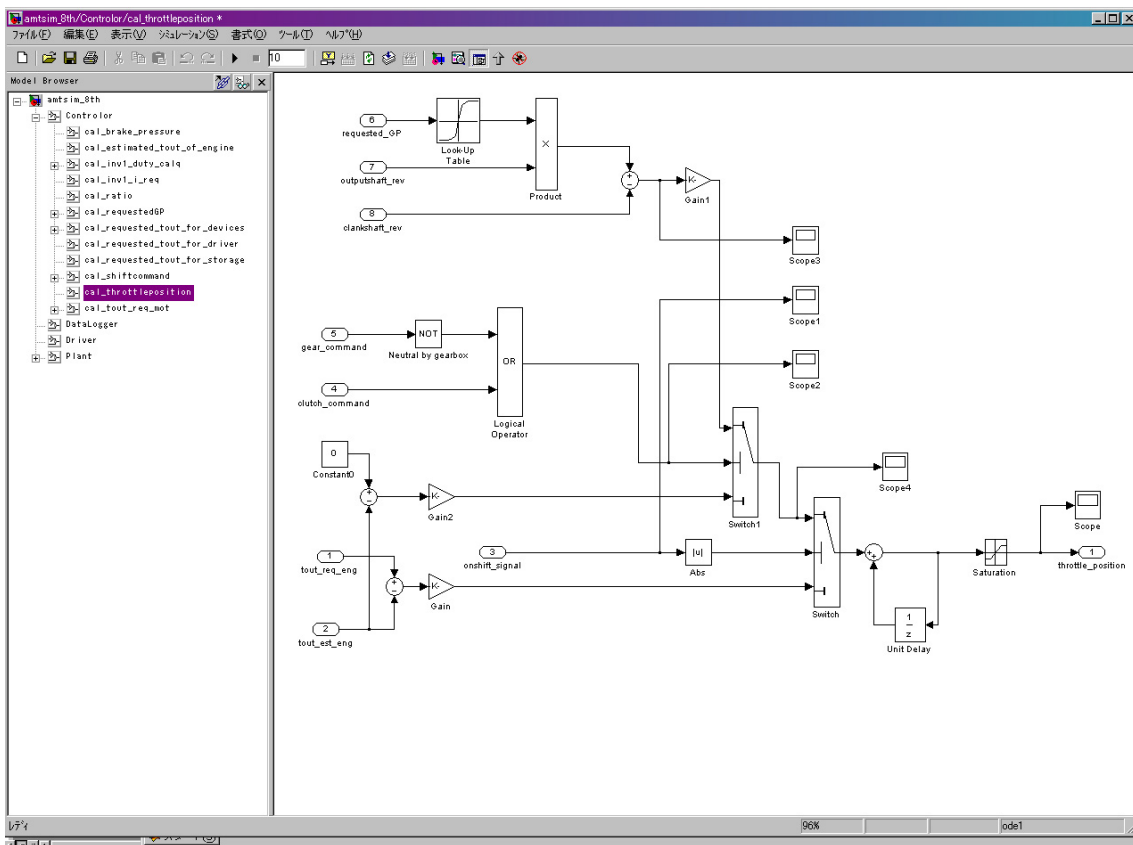


図 A.10 シミュレーションプログラム(スロットル制御部)

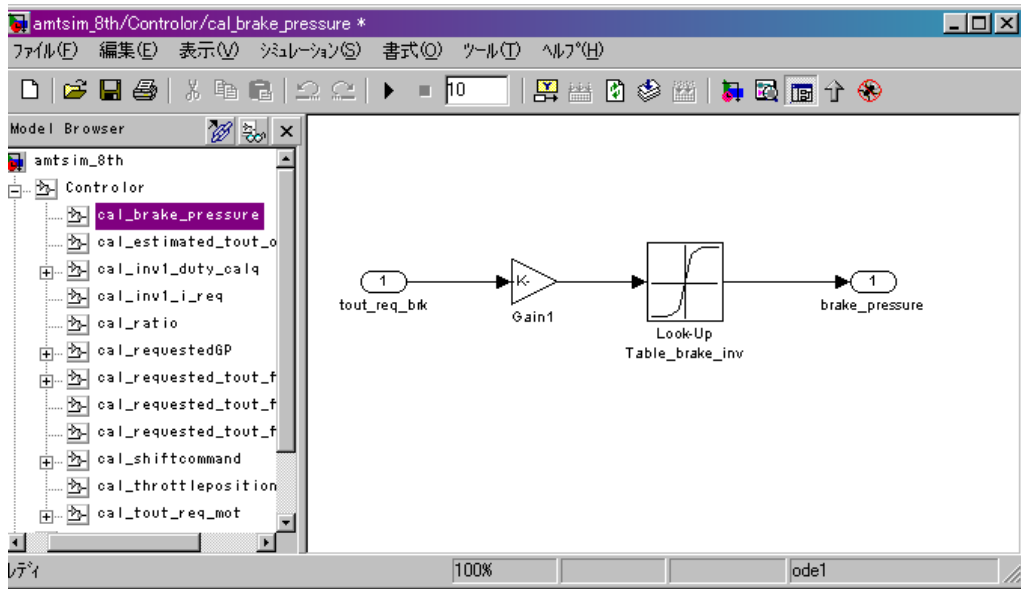


図 A.11 シミュレーションプログラム(ブレーキ制御部)

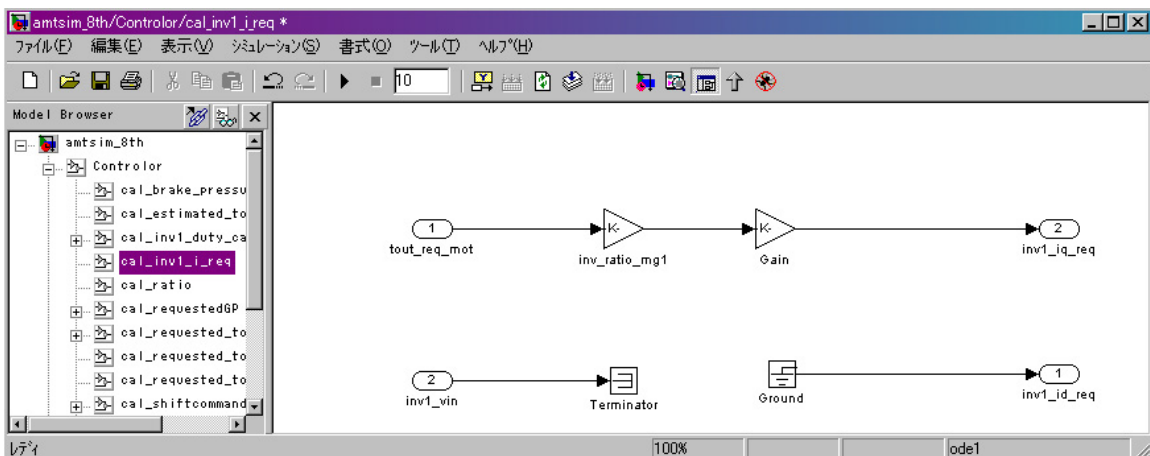


図 A.12 シミュレーションプログラム(目標電流決定部)

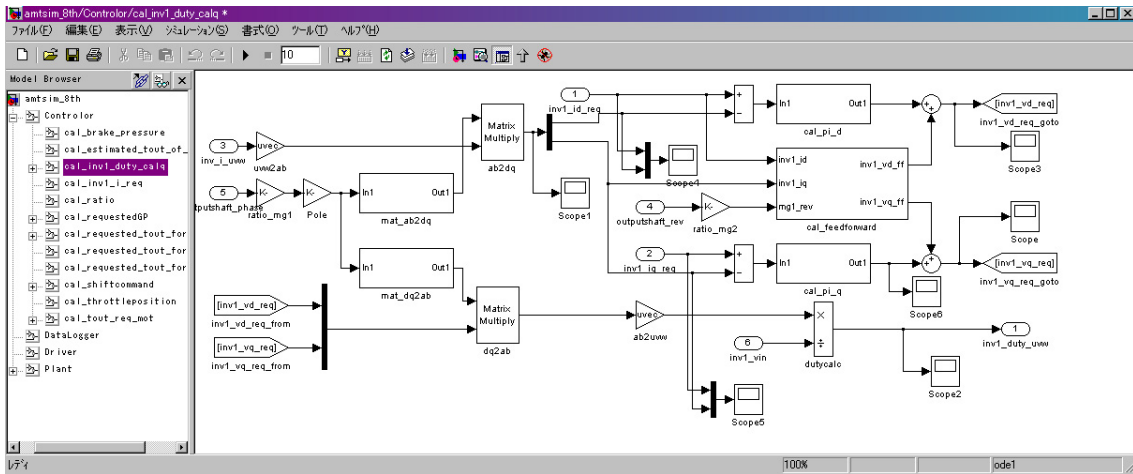


図 A.13 シミュレーションプログラム(デューティ比決定部)

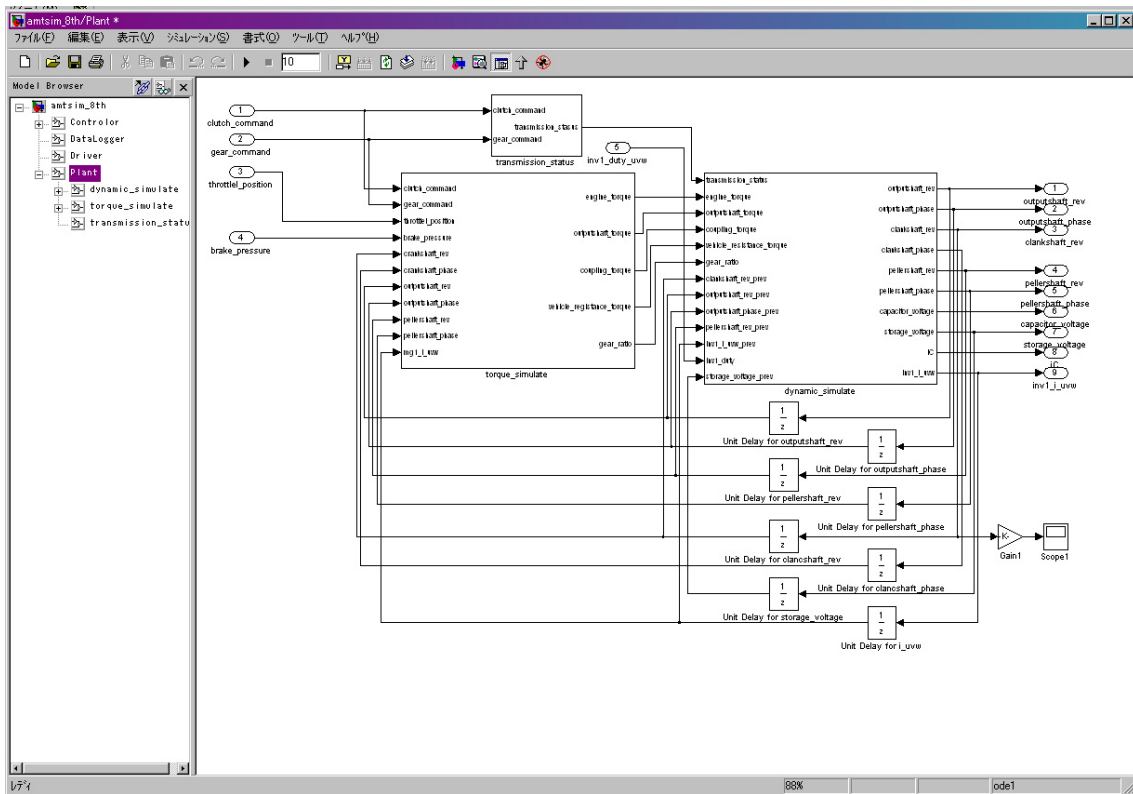


図 A.14 シミュレーションプログラム(プラントモデル)

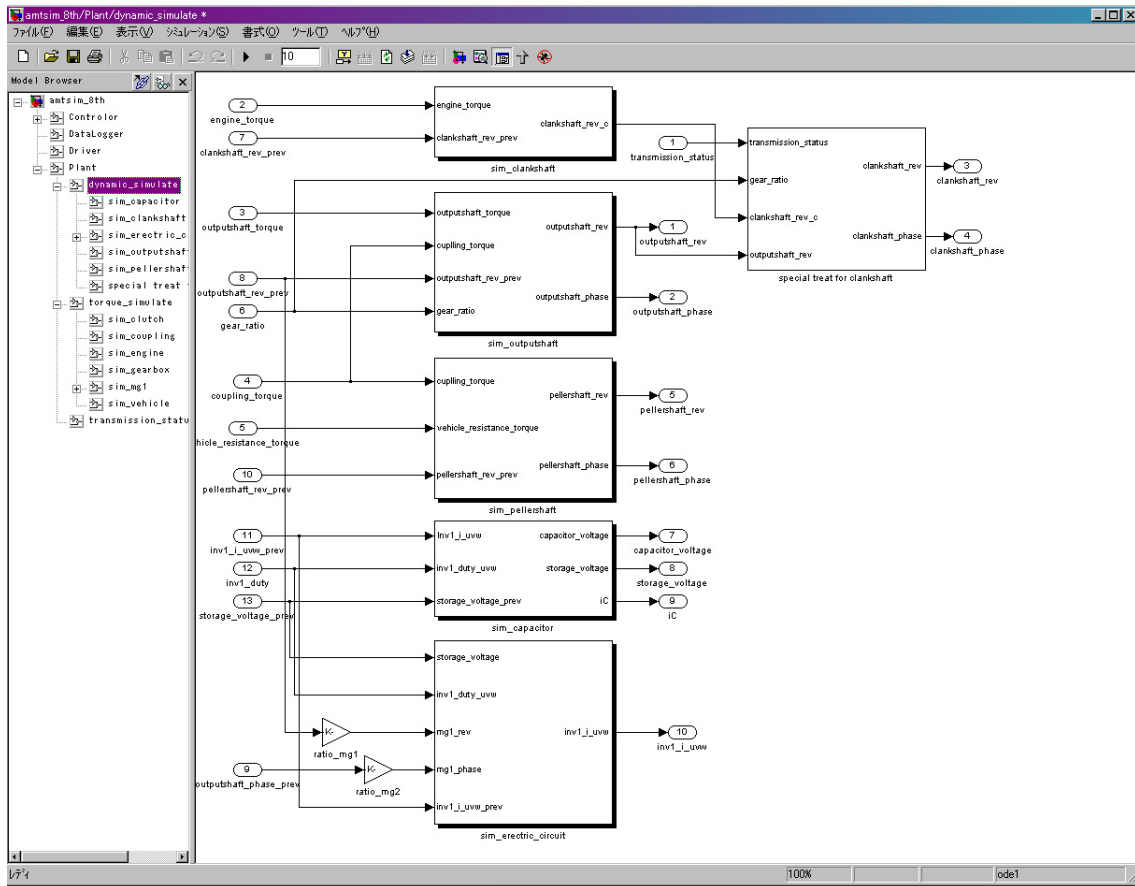


図 A.15 シミュレーションプログラム(ダイナミクスモデル)

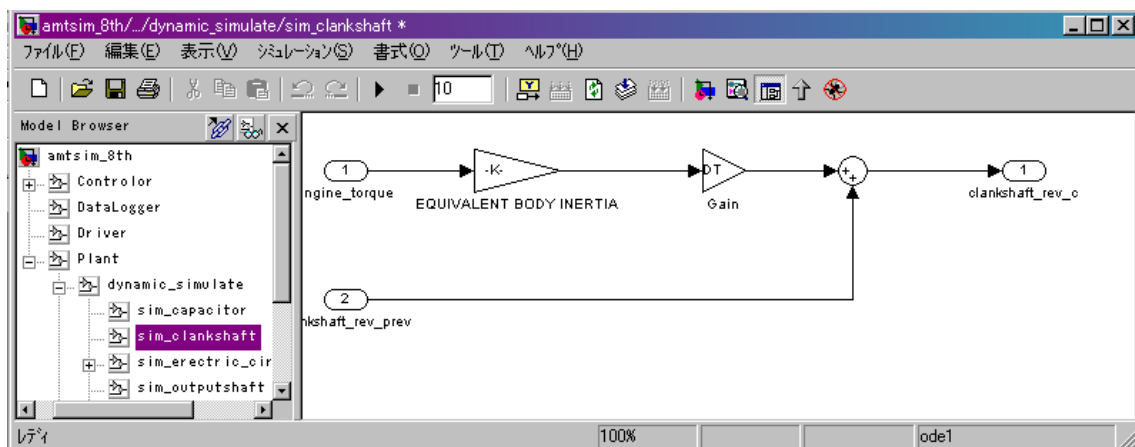


図 A.16 シミュレーションプログラム(クランクシャフトモデル)

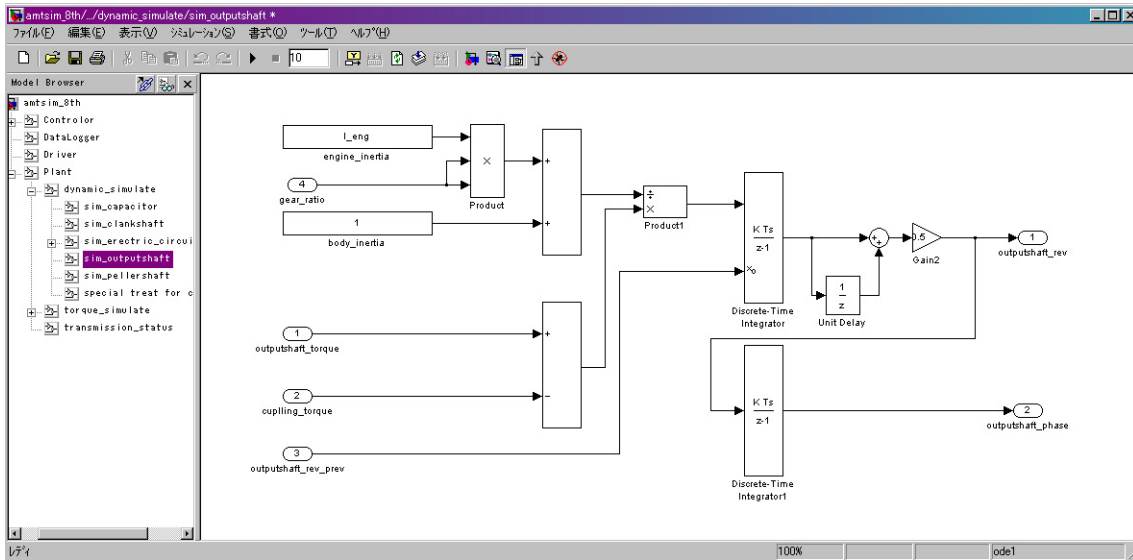


図 A.17 シミュレーションプログラム(トランスミッション出力軸モデル)

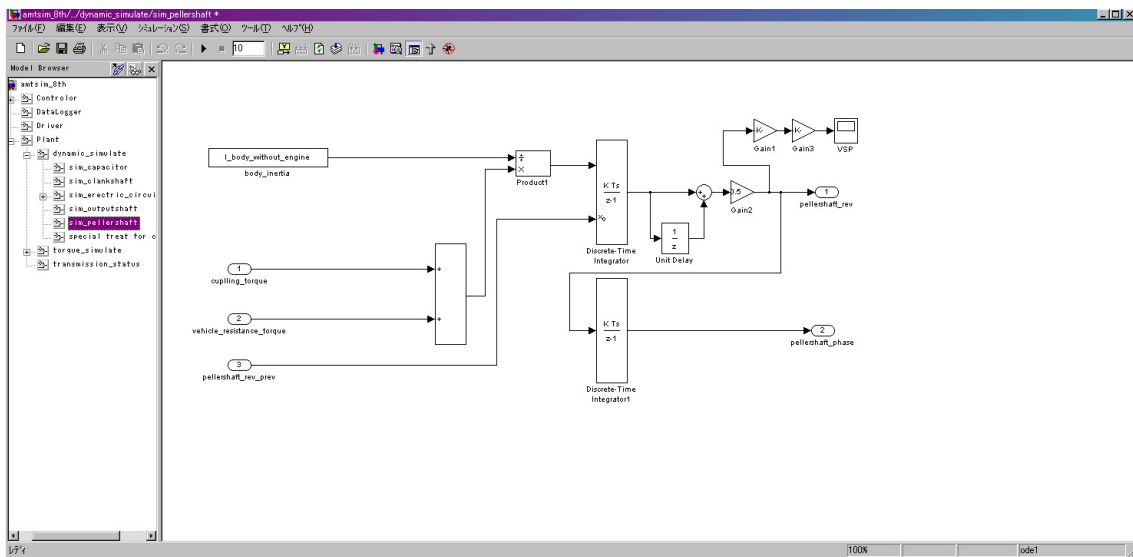


図 A.18 シミュレーションプログラム(車軸&車両モデル)

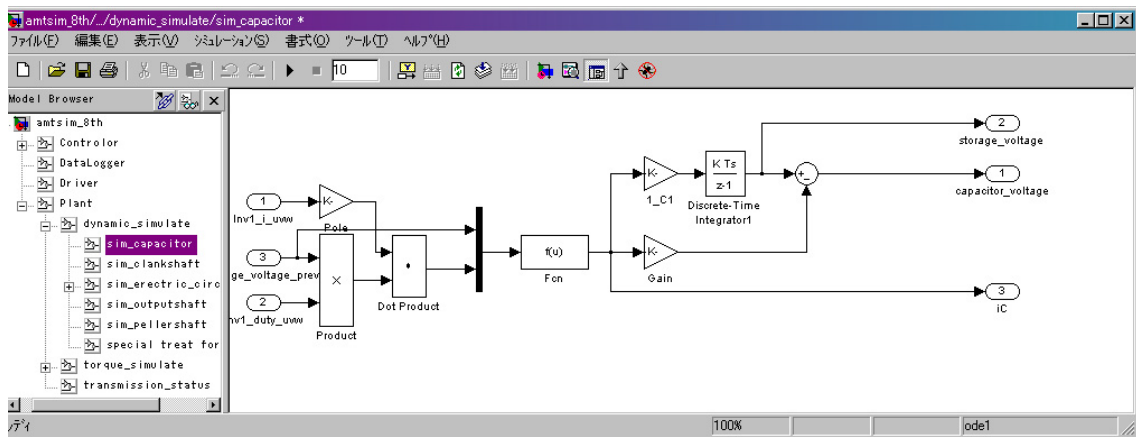


図 A.19 シミュレーションプログラム(キャパシタモデル)

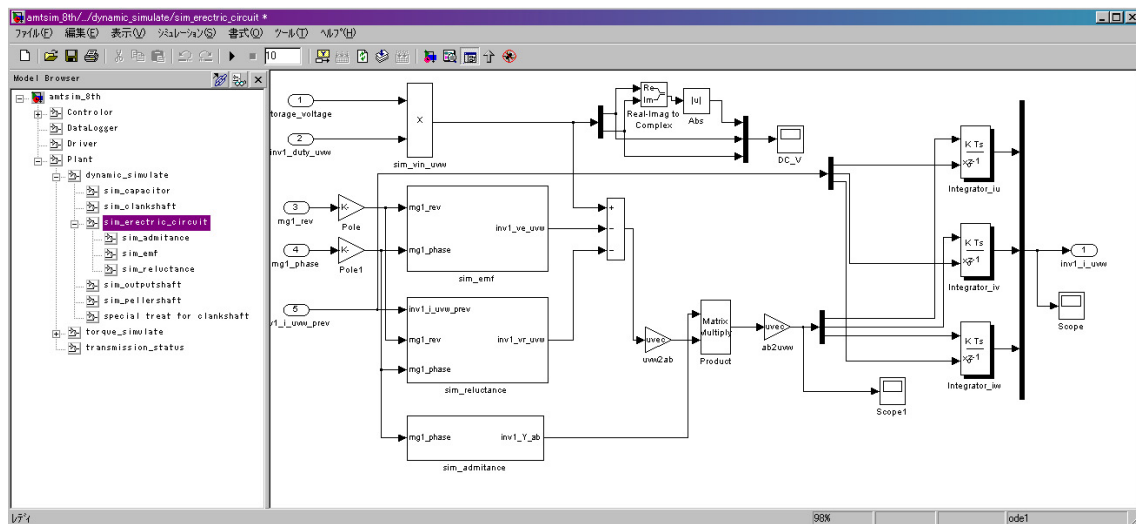


図 A.20 シミュレーションプログラム(電気回路モデル)

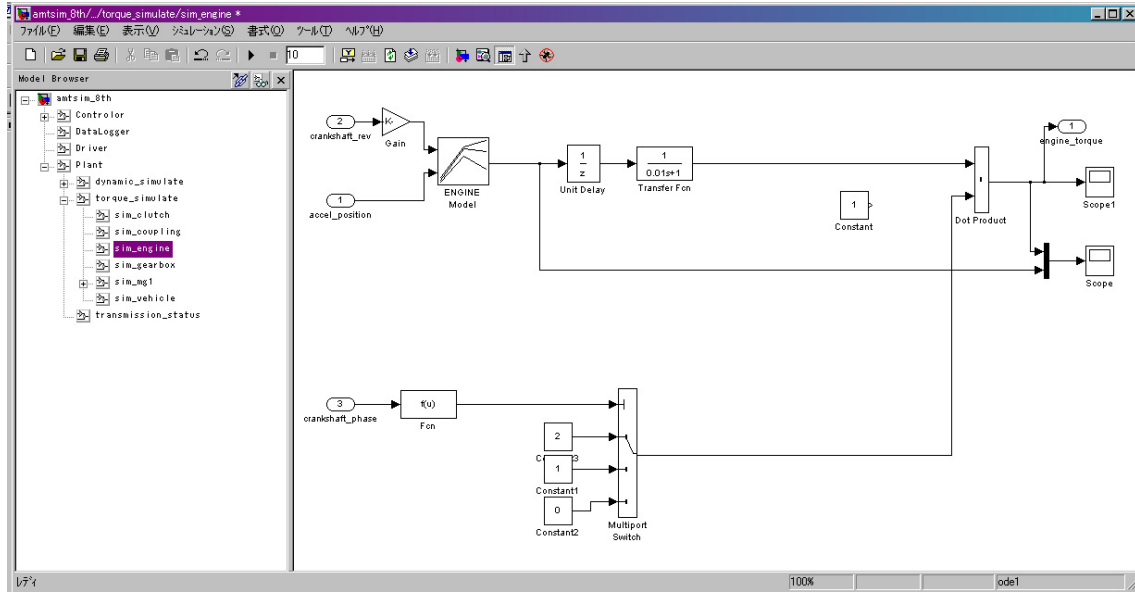


図 A.23 シミュレーションプログラム(エンジンモデル)

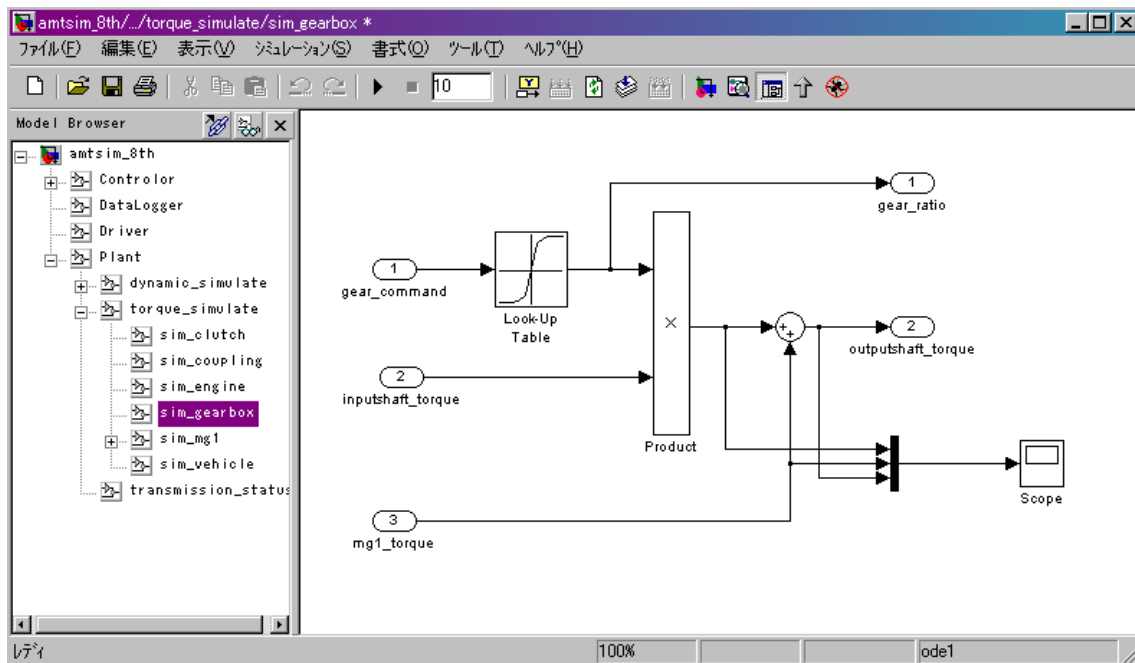


図 A.24 シミュレーションプログラム(変速機モデル)

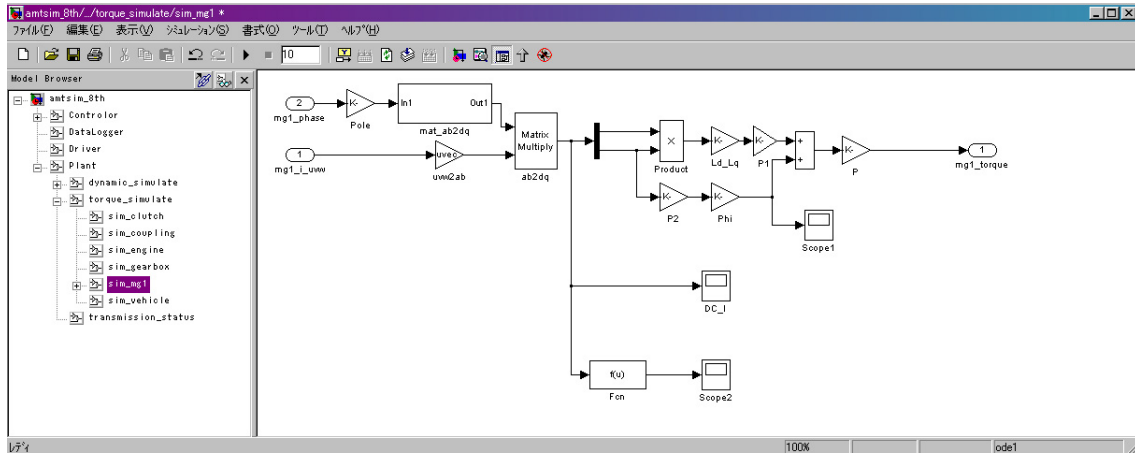


図 A.25 シミュレーションプログラム(モータモデル)

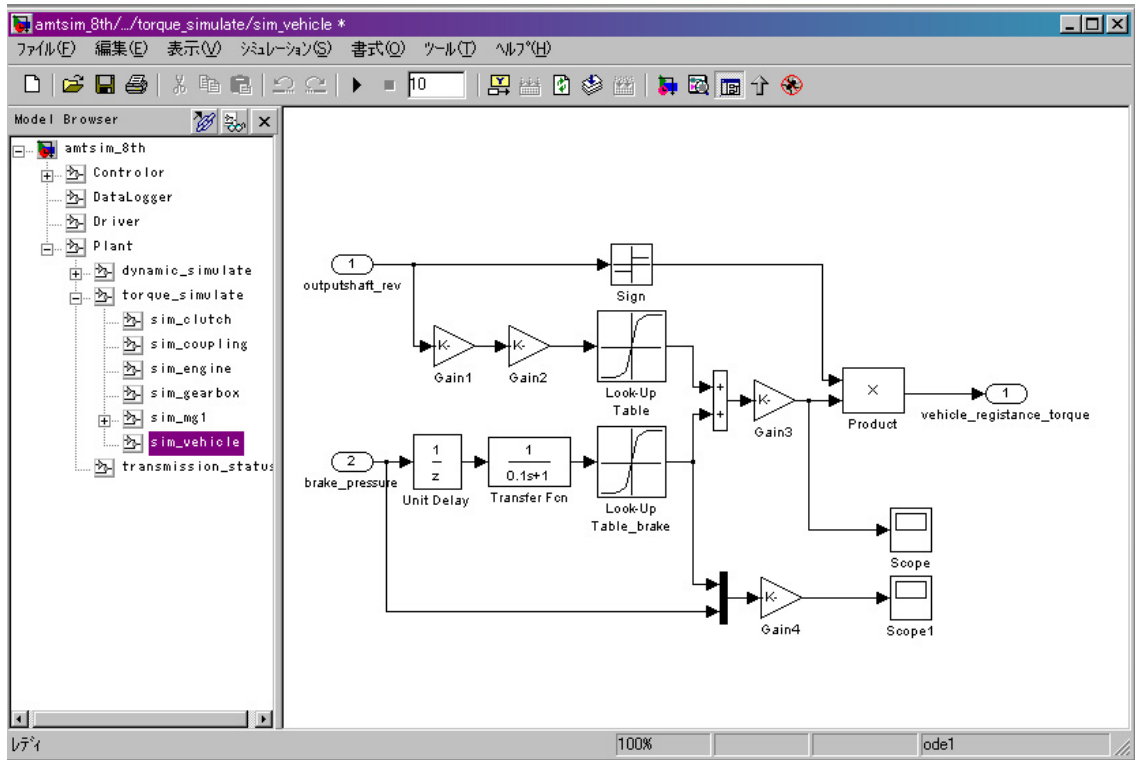


図 A.26 シミュレーションプログラム(走行抵抗モデル)

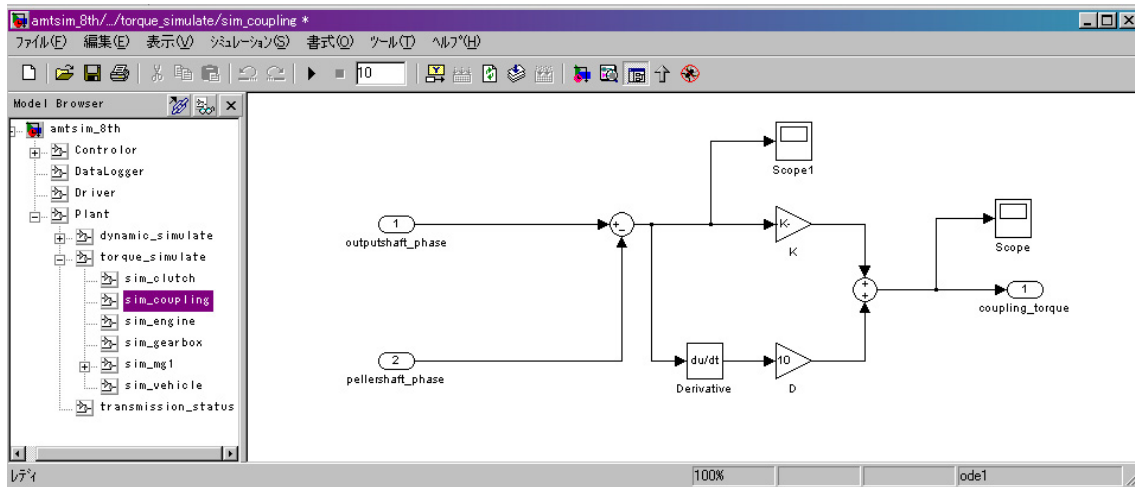


図 A.27 シミュレーションプログラム(カップリングモデル)

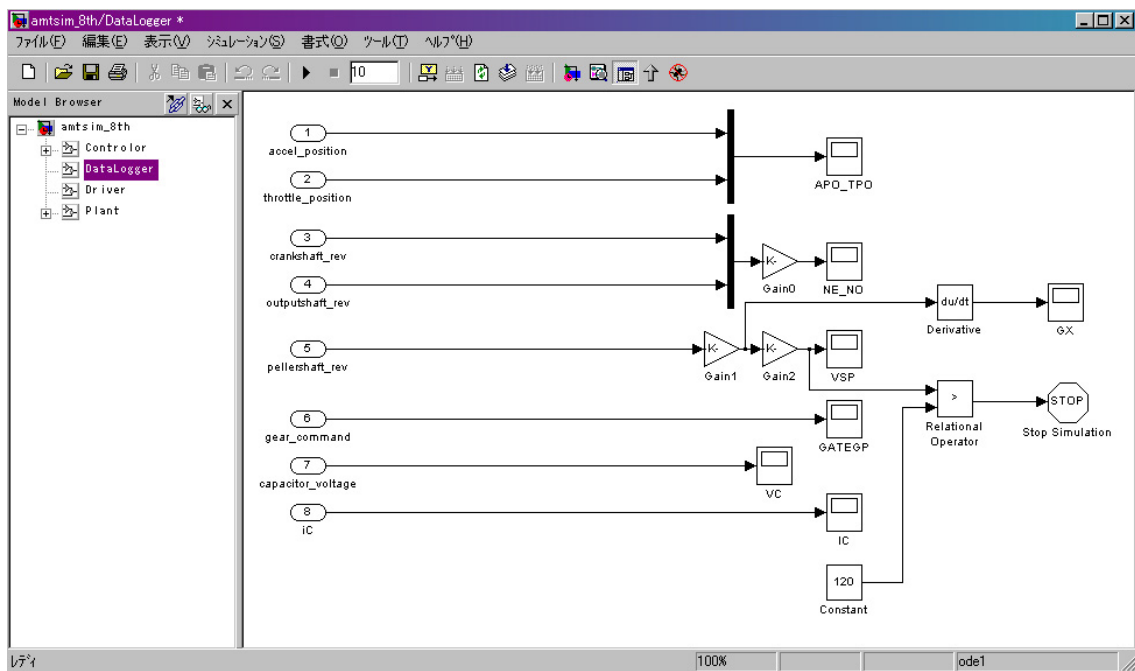


図 A.28 シミュレーションプログラム(計測器モデル)

表 A.1 シミュレーション設定定数一覧

<pre> % atsim_parameterloader.m% DT=0.00005; %simulation sampling time CT=0.0001; %controller sampling time ST=0.00001; UVW2AB = sqrt(2/3)*[1,-0.5,-0.5;0,sqrt(3)/2,-sqrt(3)/2]; AB2UVW = UVW2AB'; UVW2AB0 = sqrt(2/3)*[1,-0.5,-0.5;0,sqrt(3)/2,-sqrt(3)/2;1/sqrt(2),1/sqrt(2),1/sqrt(2)]; AB02UVW = UVW2AB0'; GR = 9.80; v_type = 'rickshaw' param_vheiclespec param_motorspec param_storagespec param_controllconstant initialcondition </pre>
<pre> %function param_vheiclespec% if all(v_type == 'rickshaw') radius_tire = 0.235; ratio_1st = 5; ratio_2nd = 2.93; ratio_3rd = 1.84; ratio_4th = 1.12; ratio_5th = 1; ratio_fd = 4.125; </pre>

```

ratio_x = [0,1,2,3,4,5];
ratio_gr = [0,ratio_1st,ratio_2nd,ratio_3rd,ratio_4th,ratio_5th];
ratioband_ratio= [0, ratio_5th*0.99, ratio_5th*1.01, ratio_4th*0.99, ratio_4th*1.01, ...
ratio_3rd*0.99, ratio_3rd*1.01, ratio_2nd*0.99, ratio_2nd*1.01, ...
ratio_1st*0.99, ratio_1st*1.01, 10];
ratioband_GP = [5.5, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 0.5];

```

```

M_body = 435;
M_driver = 130;
I_tire = 9.055*9.8/100;
I_eng = 0.2*9.8/100;
I_body_without_engine = ( (M_body + M_driver) * radius_tire^2 + 3 * I_tire ) / ratio_fd ^ 2;
vehicleregist_vsp = [0,40,80,120,160,200,240,255];
rollregist = 10;
airregist

```

0.1*[0,46.9765891,187.9063564,422.7893019,751.6254256,1174.414727,1691.157208,1909.157941];

```

vehicleregist_force = rollregist + airregist;
brakeforce_deg = [0,20,40,60,80,90];
brakeforce_force = I_body_without_engine/radius_tire^2 *ratio_fd ^ 2 *[0,0.2,0.4,0.6,0.8,0.9]*9.80;

```

teng = [...

-5.000	-0.027	4.950	9.173	10.794	12.000
-5.000	0.930	6.718	11.483	13.246	14.500
-5.000	1.456	7.690	12.754	14.595	15.876
-5.000	1.644	8.037	13.207	15.076	16.366
-5.000	1.719	8.176	13.388	15.268	16.562
-5.000	1.756	8.245	13.478	15.364	16.660
-5.000	1.719	8.176	13.388	15.268	16.562
-5.000	1.644	8.037	13.207	15.076	16.366
-5.000	1.531	7.829	12.935	14.788	16.072
-5.000	1.419	7.621	12.664	14.499	15.778
-5.000	1.306	7.413	12.392	14.211	15.484
-5.000	1.081	6.998	11.849	13.634	14.896
-5.000	0.894	6.651	11.396	13.154	14.406];


```
teng_tvo = [0 10 20 40 60 80];  
teng_ne = [600 1000 1600 1800 2000 2200 2400 2600 2800 3000 3200 3400 3600]';
```

```
%param_motorspec%
```

```
MG1SPEC.Pol = 1;  
MG1SPEC.Ld = 0.00037/1;  
MG1SPEC.Lq = 0.00037/1;  
MG1SPEC.r = 0.01;  
MG1SPEC.Phi = 0.07;
```

```
regeneration_ratio = 0.5;  
ratio_mg1 = 21*2/3;
```

```
%param_storagespec%
```

```
CPSPEC.C = 0.50;  
CPSPEC.SAFTYRATIO = 1.1;  
CPSPEC.R = 0.1;
```

```
CPSPEC1.C = 1.00;  
CPSPEC1.SAFTYRATIO = 1.1;  
CPSPEC1.R = 0.1;
```

```
CPSPEC2.C = 1.00;  
CPSPEC2.SAFTYRATIO = 1.1;  
CPSPEC2.R = 0.1;
```

```
BTSPEC.V = 200;  
BTSPEC.SAFTYRATIO = 1.1;  
BTSPEC.R = 1000;
```

```
%param_controlconstant%
```

```
shiftmap.ND1U=[0 0  
10 0  
10 255  
255 255];
```

```
shiftmap.ND2D=[0 0
```

```
7 0
```

```
7 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND2U=[0 0
```

```
20 0
```

```
20 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND3D =[0 0
```

```
15 0
```

```
15 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND3U =[0 0
```

```
30 0
```

```
30 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND4D =[0 0
```

```
25 0
```

```
25 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND4U =[0 0
```

```
200 0
```

```
200 255
```

```
255 255];
```

```
shiftmap.ND5D =[0 0
```

```
190 0
```

```
190 255
```

```
255 255];
```

```
PREPTIME2N=0.3;
```

```
%initialcondition%
outputshaft_rev0 = 10/radius_tire*ratio_fd/3600*1000;
outputshaft_phase0 = 0;
trottle_position_0 = 0;

clankshaft_rev0 = outputshaft_rev0*ratio_4th;
VCP0 = 400;
VCP1_0 = 200;
VCP2_0 = 200;

inv1_id_0=0;
inv1_iq_0=0;
```

B. 付録2 シミュレーションプログラム概要

ここでは7章で説明した実験車両について取り上げ、そのデータや設計について詳述する。

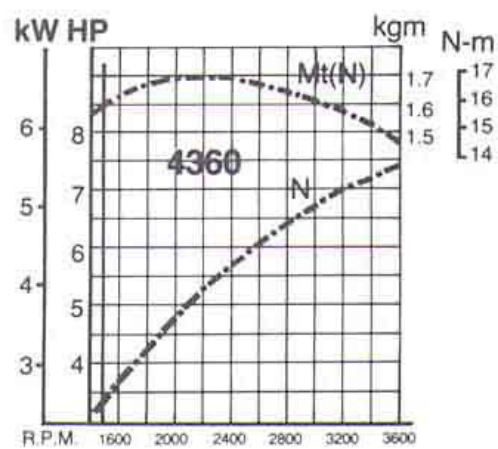
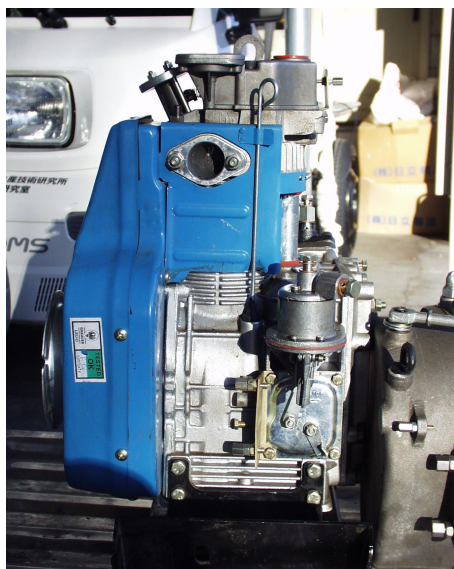


図 B.1 エンジントルク/出力線図

低電圧仕様モータ(200W仕様)静特性実測結果

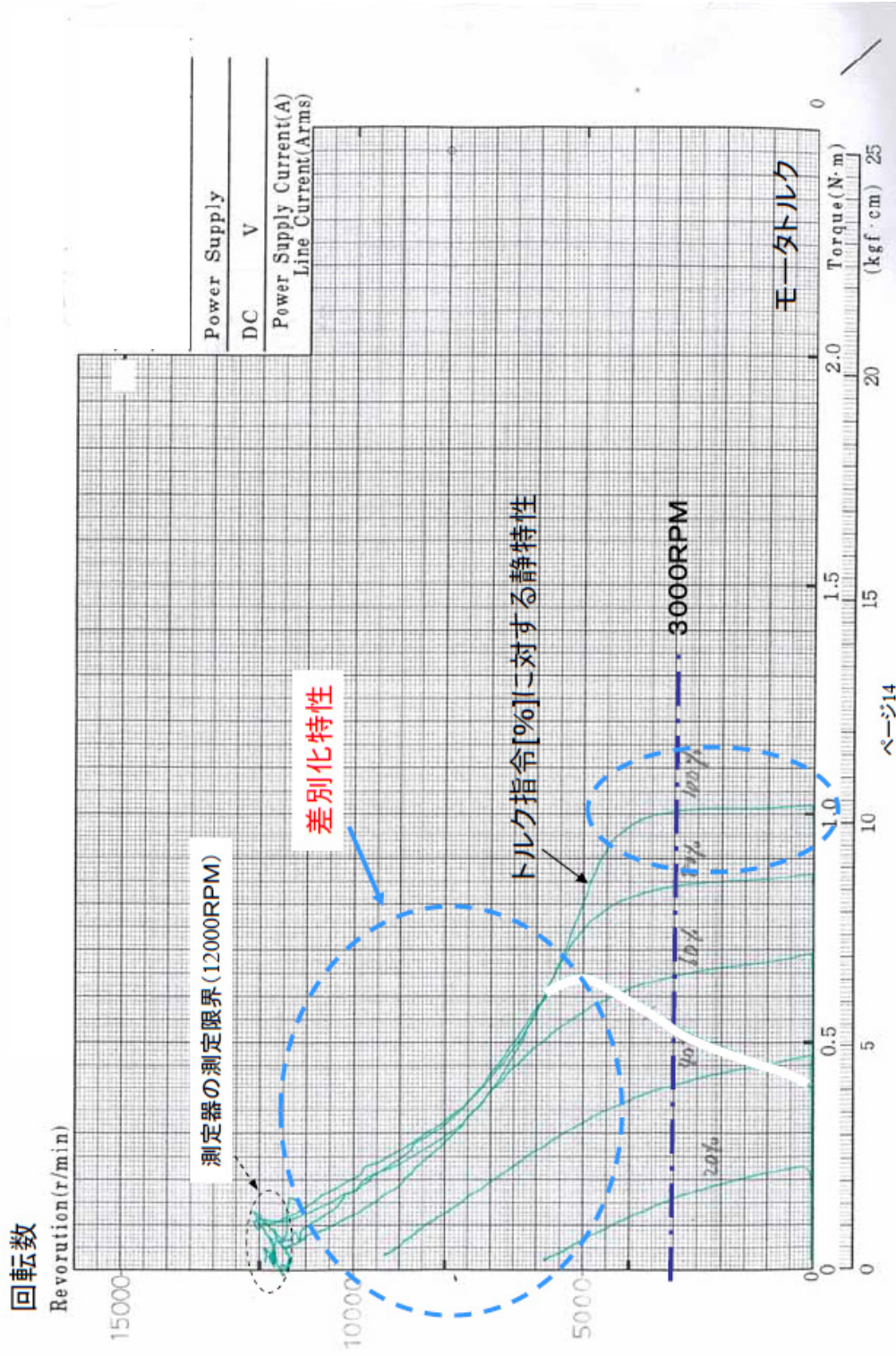


図 B.2 モータトルク線図

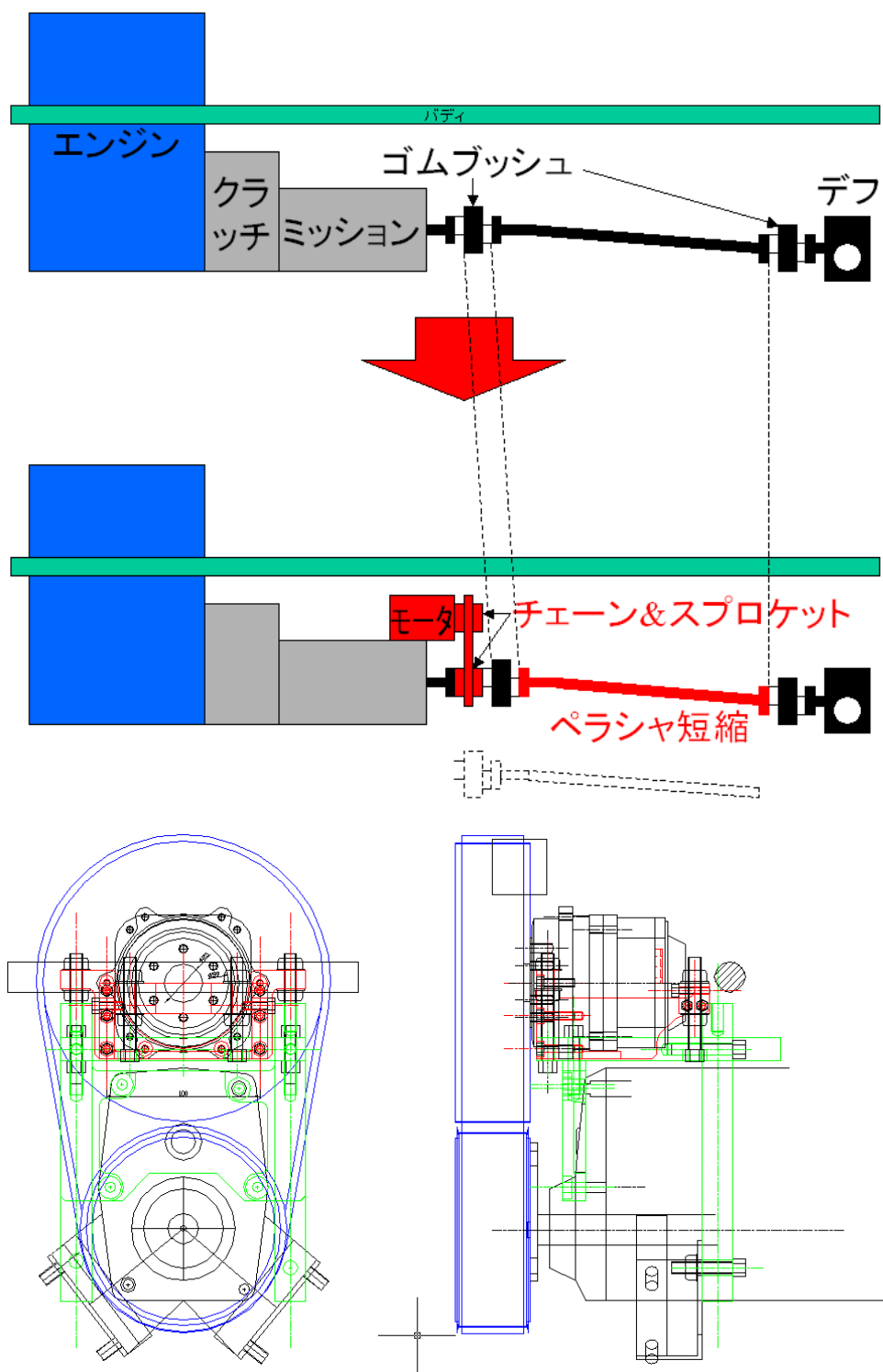


図 B.3 モータ取り付け部設計概要図

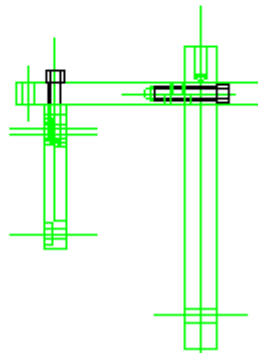
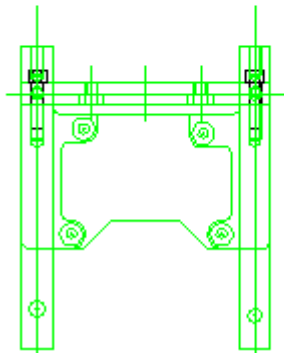
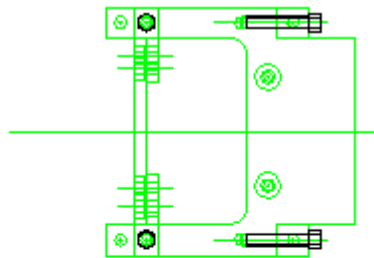
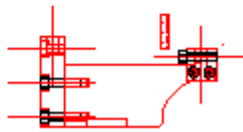
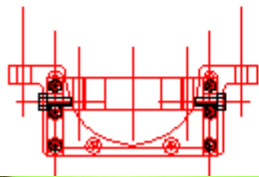
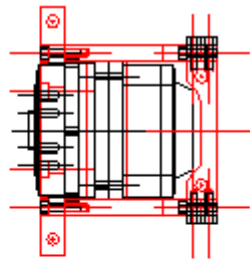


図 B.4 モータ取り付けブラケット部品図

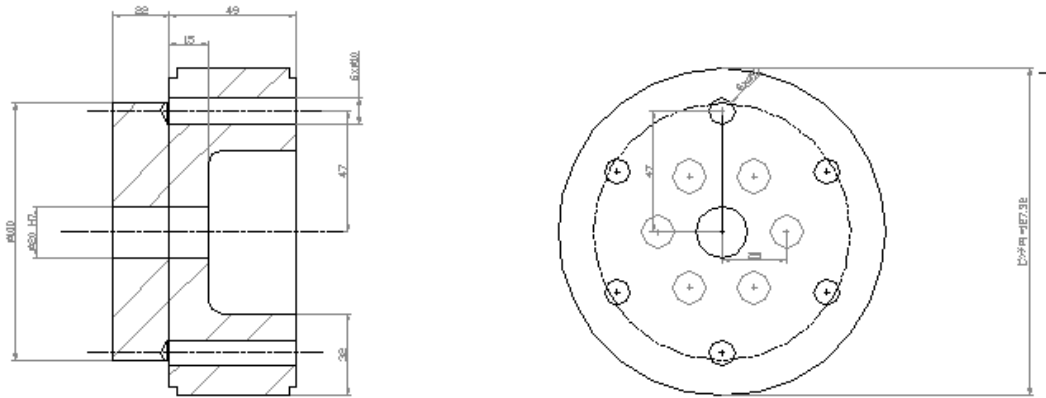
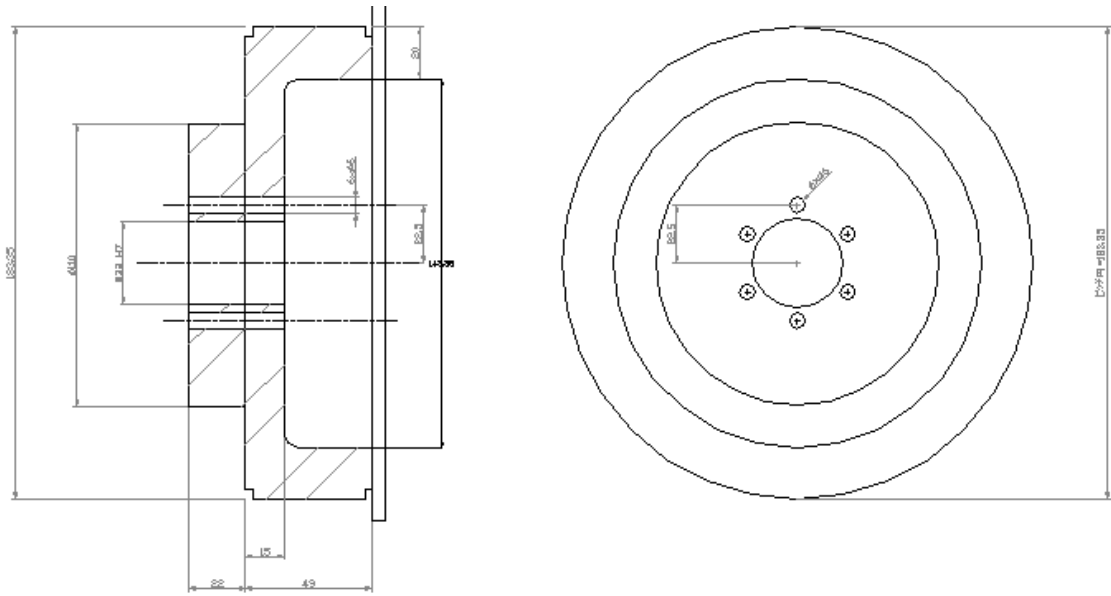


図 B.5 モータ取り付けブリー部品図

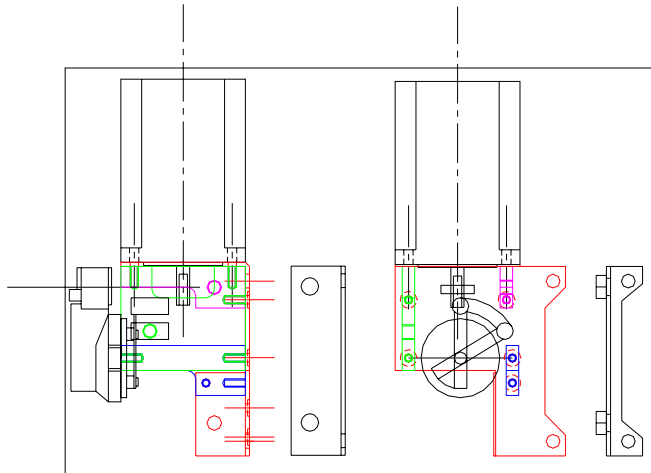
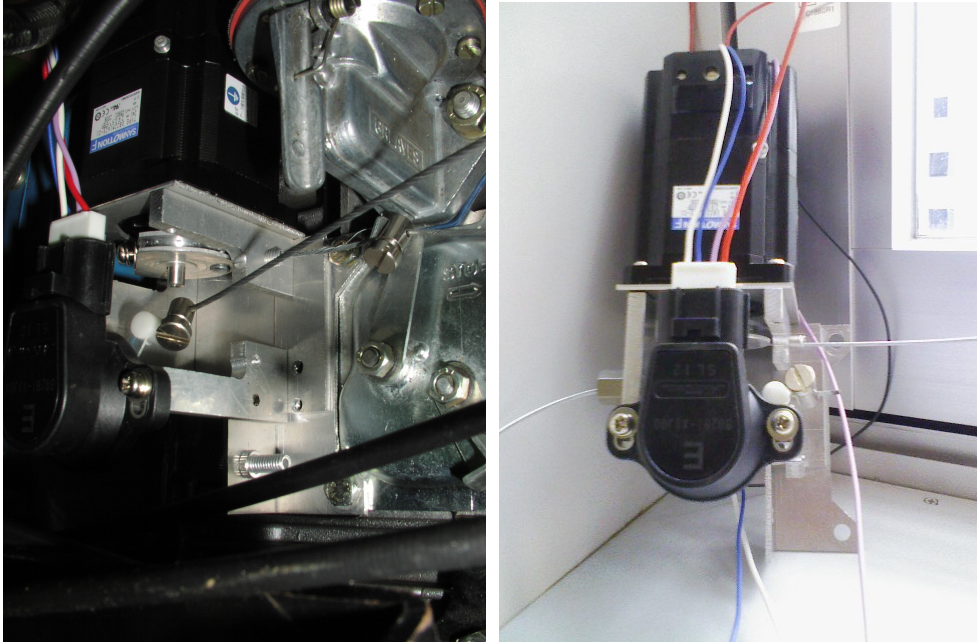


図 B.6 電動スロットルモータブラケット構造図

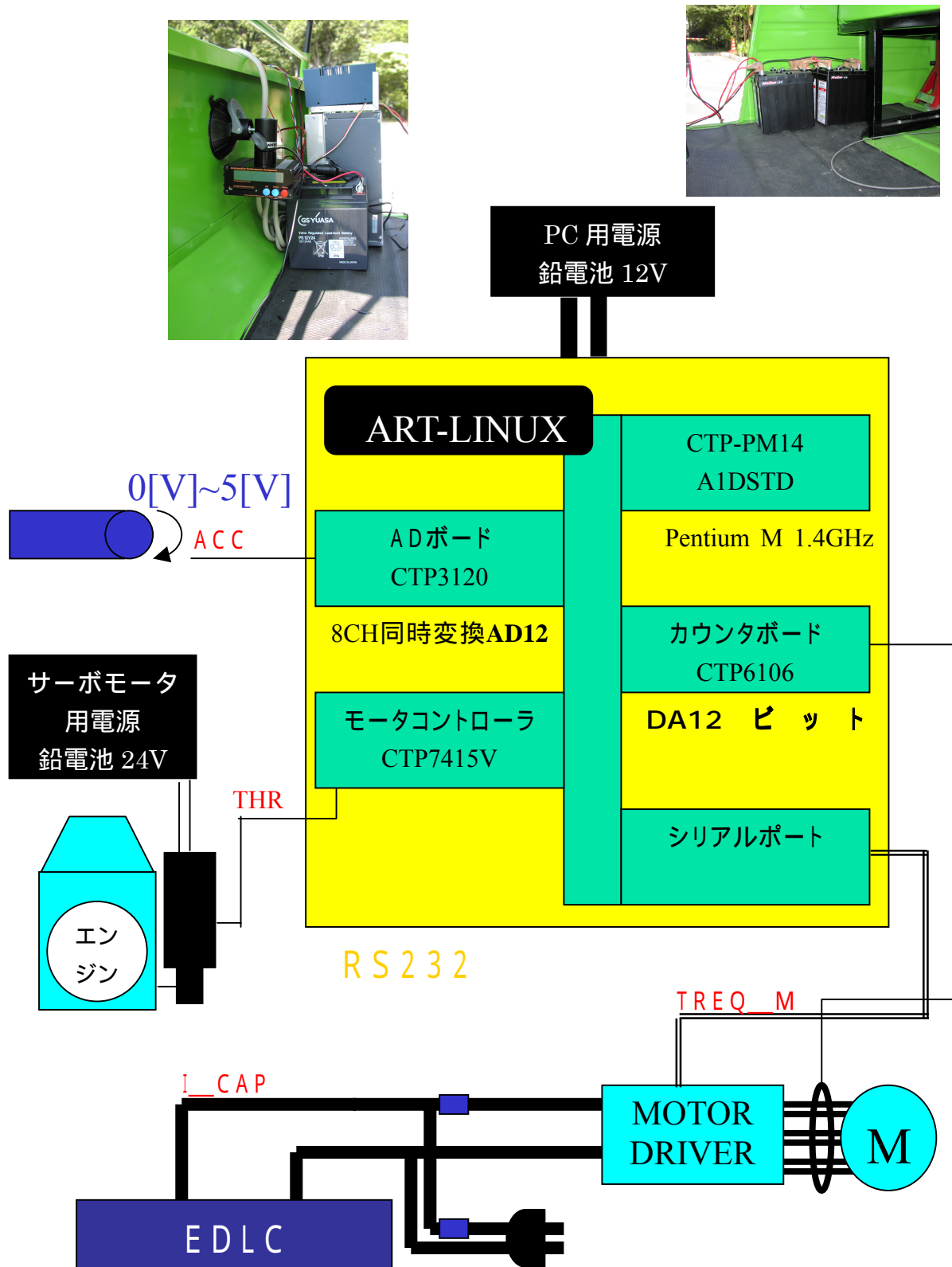


図 B.7 実験機配線図

資料 B.1 コントローラソースプログラム

```
/*
*****
martin0010.c -source code of Linux Sample Program
-----
Version 1.0
-----
Date January 18, 2009
*****
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <fcntl.h>
#include <termios.h>
#include <signal.h>
#include <errno.h>
#include <sys/signal.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/time.h>
#include <sys/io.h>
#include "cp4141.h"
#include "fbid.h"
#include "fbida.h"
#include "fbipcnt.h"
#include "fbimtn.h"

#include <linux/art_task.h> //ART-Linux

#define MAX_RECEIVE_LENGTH 128

#define BAUDRATE B19200
#define MODEMDEVICE "/dev/ttyS0"
#define _POSIX_SOURCE 1
#define SAMPLING_T 0.020

unsigned long TimerMax = (unsigned long)(60.0/SAMPLING_T);
struct termios oldtio,newtio;
int fd, RsInpurNum;
unsigned char Rs232OutputBuf[15];
unsigned char Rs232InputBuf[500];

ADSMPLREQ AdSmplConfig;
unsigned long ulSmplNum;
unsigned short AdData[1024][8];

MTNMOTION Motion[4];

unsigned long TimerCount = 0;
FILE *resfile;
double *tmpDataX;

void signal_handler_IO (int status);
int wait_flag = 1;

int Rs232Init()
{
    fd = open(MODEMDEVICE, O_RDWR | O_NOCTTY);
    if (fd < 0)
    {
        perror(MODEMDEVICE);
        return -1;
        exit(-1);
    }

    // 現在のシリアルポートの設定を待避させる
    tcgetattr(fd,&oldtio);
    // 新しいポートの設定の構造体をクリアする
    bzero(&newtio, sizeof(newtio));

    /*
    CS8      : 8n1 (8 ビット, ストップビット 1)
    CLOCAL  : ローカル接続, モデム制御なし
    CREAD   : 受信文字(receiving characters)を有効にする.
    */
    newtio.c_cflag = CS8 | CLOCAL | CREAD ;// CRTSCTS ;

    // ICRNL : キャリッジリターンをラインフィードに読みかえる
    newtio.c_iflag = IGNPAR | ICRNL | IGNBRK;
    newtio.c_iflag = ICRNL;

    // Raw モードでの出力
    newtio.c_oflag = 0;

    // Raw モードで、カノニカル入力を無効にする
    newtio.c_lflag = 0;

    // キャラクタ間タイマを使わない

```

```

newtio.c_cc[VTIME] = 0;
// 1文字来るまで、読み込みをブロックする
newtio.c_cc[VMIN] = 1;

// モデムラインをクリアし、ポートの設定を有効にする
tcflush(fd, TCIFLUSH);
cfsetispeed(&newtio, B19200);
cfsetospeed(&newtio, B19200);
tcsetattr(fd, TCSANOW, &newtio);

// 受信データがない場合にも、待たさず、即座に戻る。
fcntl(fd, F_SETFL, FNDELAY);
printf("BAUDRATE is %i\n", cfgetospeed(&newtio));

return 0;
}

int Rs232End()
{
    int nRet;

    // ポートの設定をプログラム開始時のものに戻す
    tcsetattr(fd, TCSANOW, &oldtio);

    nRet = close(fd);
    if(nRet == -1)
    {
        printf("RS232C CloseError\n");
        return -1;
    }

    return 0;
}

int AdInit(int nDevice )
{
    int nRet;

    nRet = AdOpen( nDevice );
    if(nRet != AD_ERROR_SUCCESS)
    {
        printf("Open Error\n");
        return -1;
    }

    // サンプリング条件の取得
    AdGetSamplingConfig( 1, &AdSmplConfig );

    AdSmplConfig.ulChCount = 8;
    AdSmplConfig.SmplChReq[0].ulChNo = 1;
    AdSmplConfig.SmplChReq[2].ulChNo = 3;
    AdSmplConfig.SmplChReq[2].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.SmplChReq[3].ulChNo = 4;
    AdSmplConfig.SmplChReq[3].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.SmplChReq[4].ulChNo = 5;
    AdSmplConfig.SmplChReq[4].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.SmplChReq[5].ulChNo = 6;
    AdSmplConfig.SmplChReq[5].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.SmplChReq[6].ulChNo = 7;
    AdSmplConfig.SmplChReq[6].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.SmplChReq[7].ulChNo = 8;
    AdSmplConfig.SmplChReq[7].ulRange = AD_5V;
    AdSmplConfig.ulSamplingMode = AD_IO_SAMPLING;
    AdSmplConfig.ulSingleDiff = AD_INPUT_DIFF;
    AdSmplConfig.ulSmplNum = 1024;
    AdSmplConfig.ulSmplEventNum = 0;
    AdSmplConfig.fSmplFreq = 10000;
    AdSmplConfig.ulTrigPoint = AD_TRIG_START;
    AdSmplConfig.ulTrigMode = AD_FREERUN;
    AdSmplConfig.fTrigDelay = 0;
    AdSmplConfig.ulTrigCh = 1;
    AdSmplConfig.ulEClkEdge = AD_DOWN_EDGE;
    AdSmplConfig.ulATrgPulse = AD_LOW_PULSE;
    AdSmplConfig.ulTrigEdge = AD_DOWN_EDGE;
    AdSmplConfig.ulTrigDI = 1;
    AdSmplConfig.ulFastMode = AD_NORMAL_MODE;

    // サンプリング条件の設定
    AdSetSamplingConfig( nDevice, &AdSmplConfig );

    // 連続サンプリングの開始
    AdStartSampling( nDevice, FLAG_ASYNC );
    return 0;
}

int AdEnd(int nDevice)
{
    int nRet;

    nRet = AdClose( nDevice );
    if(nRet != AD_ERROR_SUCCESS)
    {
        printf("CloseError\n");
    }
}

```

```

        }
        return -1;
    }
    return 0;
}

int CntInit(int nDevice )
{
    int nRet;

    nRet=PcntOpen( nDevice, PCNT_FLAG_NORMAL);
    if(nRet) {
        printf("Error: ret=%Xh\n", nRet);
        return(-1);
    }

    nRet = PcntSetMode( nDevice, 1, 3, 1, 0, 0 );
    if(nRet != PCNT_ERROR_SUCCESS) {
        printf("Failed to configure the count mode.\n");
        return(-1);
    }

    nRet = PcntEnable( nDevice, 1, 1 );
    if(nRet != PCNT_ERROR_SUCCESS) {
        printf("Failed to enable the count\n");
        return(-1);
    }

    nRet = PcntClear( nDevice, 1 );
    return 0;
}

int CntEnd(int nDevice)
{
    int nRet;

    nRet = PcntEnable( nDevice, 1, 0 );
    if(nRet != PCNT_ERROR_SUCCESS) {
        printf("Failed to disable the count.\n");
        return(-1);
    }
    printf("-Count Stop!\n");

    nRet = PcntClose(nDevice);
    if(nRet !=PCNT_ERROR_SUCCESS) {
        printf("Failed to close the device.\n");
        return(-1);
    }

    return 0;
}

int MtnInit(int nDevice ,long counter[4])
{
    int nRet;

    nRet = MtnOpen(nDevice, MTR_FLAG_NORMAL);
    if(nRet) nDevice = -1;

    /* == MtnSetPulseOut == */
    nRet = MtnSetPulseOut(nDevice, 0x0f, MTR_METHOD, 0x0f);
    if(nRet) return(nRet);

    /* Clear counter */
    /* == MtnWriteCounter == */
    nRet = MtnWriteCounter(nDevice, 0x0f, MTR_COUNTER, counter);
    if(nRet) return(nRet);

    return 0;
}

int MtnEnd(int nDevice)
{
    int nRet;

    nRet = MtnClose(nDevice);
    if(nRet)
    {
        printf("CloseError\n");
        return -1;
    }

    return 0;
}

int Mtn_PTP_motion(int nDevice, MTNMOTION ary_info[4], int axis_x, int axis_y, int axis_z, int axis_u)
{
    int i,nRet,step = 0;
    unsigned short axis;

    axis = 1;
    for (i = 0; i < 4; i++){

```

```

        switch(i){
        case 0:    step = axis_x; break;
        case 1:    step = axis_y; break;
        case 2:    step = axis_z; break;
        case 3:    step = axis_u; break;
        default: break;
        }
        if(step != 0){
            ary_info[i].lStep = step;
        }
    }

    if(axis != 0){
        nRet = MtnSetMotion(nDevice, axis, MTR_PTP, ary_info);
        if(nRet){
            printf("MtnSetMotionError errNO = %x\n", nRet);
            return -1;
        }

        nRet = MtnStartMotion(nDevice, axis, MTR_ACC, MTR_PTP | MTR_ABSOLUTE);
        if(nRet){
            printf("MtnStartMotionError errNO = %x\n", nRet);
            return -2;
        }
    }

    return 0;
}

int open_bord_0010(void)
{
    struct sigaction saio;
    long counter[4];

    /* open RS232(CH1) port */
    if(Rs232Init() == -1)
    {
        printf("RS232C Open Error\n");
        exit(1);
    }
    printf("RS232 Port is opened! \n");
    saio.sa_handler = signal_handler_IO;
    sigemptyset(&saio.sa_mask);
    saio.sa_flags = 0;
    saio.sa_restorer = NULL;
    sigaction(SIGIO, &saio, NULL);
   fcntl(fd, F_SETOWN, getpid());
    fcntl(fd, F_SETFL, FASYNC);

    //AD Initialize
    if(AdInit(1) == -1)
    {
        printf("AD Open Error\n");
        exit(1);
    }

    //MTN Initialize
    if(MtnInit(5, counter) == -1)
    {
        printf("MTN Open Error\n");
        exit(1);
    }

    //CounterBord Initialize
    if(CntInit(6) == -1)
    {
        printf("CounterBord Open Error\n");
        exit(1);
    }
    return 0;
}

int close_bord_0010(void)
{
    //RS232 Close
    strcpy(Rs232OutputBuf, "sv 0\n");
    write(fd, Rs232OutputBuf, 5);
    if(Rs232End() == -1)
    {
        printf("RS232 Close Error\n");
        exit(1);
    }

    //AD Close
    if(AdEnd(1) == -1)
    {
        printf("AD Close Error\n");
        exit(1);
    }

    //MTN Close
    if(MtnEnd(5) == -1)
    {
        printf("MTN Close Error\n");
    }
}

```

```

        }
        exit(1);
    }
    //CounterBord Close
    if(CntEnd(6) == -1)
    {
        printf("CounterBord Close Error\n");
        exit(1);
    }
    return 0;
}

int reset_0010(void)
{
    int i;

    // Output to RS232C
    strcpy(Rs232OutputBuf, "sv 1Yrtr 0000Yr");
    write(fd, Rs232OutputBuf, 13);

    for (i = 0; i < 4; i++){
        Motion[i].wClock = 299;
        Motion[i].wAccMode = MTR_ACC_NORMAL;
        Motion[i].fLowSpeed = (float)10.0;
        Motion[i].fSpeed = (float)10000.0;
        Motion[i].ulAcc = SAMPLING_T*1000;
        Motion[i].ulDec = SAMPLING_T*1000;
        Motion[i].fSAccSpeed = (float)0.0;
        Motion[i].fSDecSpeed = (float)0.0;
        Motion[i].lStep = 0;
    }
    Mtn_PTP_motion(5, Motion, 0, 0, 0, 0);

    return 0;
}

int main(void)
{
    int ret;
    unsigned int uint_tr_req = 0;
    unsigned int uint_thr_trg = 0;
    unsigned short nCounter;
    double vsp = 0;
    printf("Experiment Start! \n");
    printf("Time is: %ld seconds\n", (unsigned long)(TimerMax * SAMPLING_T));

    //open bords
    ret = open_bord_0010();
    resfile=fopen("./result.data", "w+");
    usleep(10000);

    //reset subparameters
    ret = reset_0010();
    usleep(10000);

    //Enter Realtime Mode
    if(art_enter(ART_PRIO_MAX, ART_TASK_PERIODIC, (unsigned int)(SAMPLING_T*1000000)) == -1)
    {
        perror("art_enter error\n");
        exit(1);
    }
    printf("ART MODE enters! \n");

    if(art_wait() == -1) {
        perror("art_wait");
        exit(1);
    }

    for (TimerCount=0; TimerCount<TimerMax; TimerCount++)
    {
        if(art_wait() == -1) {
            perror("art_wait");
            exit(1);
        }

        if(wait_flag == 0) {
            ret = read(fd, Rs232InputBuf, 500);
            if(ret < 0 && errno != EAGAIN) {
                printf("read error:errno=%d\n", errno);
                break;
            }
            if(ret > 0) {
                Rs232InputBuf[ret] = '\0';
            }
            wait_flag = 1;
        }

        ulSmplNum = 8;
        AdGetSamplingData( 1, &AdData[0][0], &ulSmplNum );
        ret=AdStartSampling( 1, FLAG_ASYNC );
    }
}

```

```

        ret = PcntRead( 6, 1, &nCounter );
ret = PcntClear( 6, 1 );
vsp = (4*vsp + (double)nCounter)/5;
uint_tr_req = (unsigned int)Y
((7*uint_tr_req + ((AdData[0][0]-2560)>0)*(AdData[0][0]-2560))*1/1)/8;
uint_thr_trg = (unsigned int)Y
(7*uint_thr_trg + ((AdData[0][0]-2560)>0)*(AdData[0][0]-2560)*384/2048)/8;

if(uint_tr_req<=0){
    sprintf(Rs232OutputBuf,"tr 0000Yr");
}else{
    sprintf(Rs232OutputBuf,"tr %xYr", 0x10000 - uint_tr_req);
}

write(fd, Rs232OutputBuf, 8);
Mtn_PTP_motion(5, Motion, uint_thr_trg, 0, 0, 0);

fprintf(resfile,"%f,%d,%f,%d,%dYn", Y
    SAMPLING_T * TimerCount, AdData[0][0], vsp, uint_tr_req, uint_thr_trg);
printf("tmpData is %f,%d,%f,%d,%dYn", Y
    SAMPLING_T * TimerCount, AdData[0][0], vsp, uint_tr_req, uint_thr_trg);
}
printf("terminate program.Yn");

//Realtime Mode End
if(art_exit() == -1)
{
    perror("art_exit errorYn");
    exit(1);
}

ret = reset_0010();
ret = close_bord_0010();

fclose(resfile);

exit(0);
}

void signal_handler_IO (int status)
{
    wait_flag = 0;
}

```


参考文献

- (1) 吉田：「電気自動車の挑戦」,自動車技術, Vol.61, No.9, pp. 89-94, 自動車技術会(2007/09)
- (2) 寺谷：「電気が進化させる自動車技術」, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.10, pp887-894, 電気学会(2005/10)
- (3) 大窪：「普及を目指した GLOBAL ハイブリッドカーの開発 (新型インサイト小特集)」, Honda R&D technical review Vol.21 No.1, pp.73-82, 本田技術研究所(2009/4)
- (4) 佐々木：「キャパシタハイブリッドバスについて - ハイブリッド商用車へのキャパシタ応用 - 」, ハイブリッド技術シンポジウム, 20024222, pp29-34, 自動車技術会(2002/5)
- (5) 神谷：「超小型 EV COMS の開発」, JEVA 電気自動車フォーラム 2001, pp.85-94(2001/11)
- (6) BCC Research: “Hybrid & Electric Vehicle Progress Review” (2009/03)
- (7) T. Hofman : ” Development of a Micro-Hybrid System for a Three-Wheeled Motor Taxi”, EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, (2009/05)
- (8) 村田：「路線バス用シリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率：実走行条件における車上発電エネルギーの充放電損失等に関する検討(熱工学,内燃機関,動力など)」, 日本機械学会論文集. B 編, Vol. 70(697), pp.2474-2481, 日本機械学会(2004/09)
- (9) Nomoto : “ Hybrid Traction System for Railway Vehicles ”, EVS21 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, (2005/04)
- (10) 大熊：「ハイブリッド電気自動車における電気技術」, 電気学会論文誌 D, Vol.127, No.2, pp98-101, 電気学会(2007/02)
- (11) 曾我：「モータ式オートメテッドマニュアルトランスミッションの開発」, 自動車技術, Vol.58, No.9, pp. 62-67, (2004/09)

- (12) 佐藤：「HEV 用ニッケル・水素蓄電池」, Matsushita technical journal, Vol.48, No.4, pp.273-278(2002/8)
- (13) 山本：「新規二次電池材料の最新技術」, CMC 社 , p.241 (1997)
- (14) 新神戸電機(株)Web サイトより(<http://www.shinkobe-denki.co.jp/>)
- (15) 岡村：「電気二重層キャパシタと蓄電システム第3版」, 日刊工業新聞社 (2005/9)
- (16) 近藤：「移動体用エネルギーストレージ技術の現状と展望」, 移動体エネルギーストレージ調査専門委員会編 (2009/07)
- (17) 河村：「現代パワーエレクトロニクス」, 数理工学社 (2005/04)
- (18) 松瀬：「電動機制御工学」, 電気学会 (2007/02)
- (19) LOVSON 社 Web サイトより：(http://www.lovson.com/html/three_wheelers.htm)
- (20) 日本自動車工業会：「自動車ガイドブック 2007~2008 vol.54」, 日本自動車工業会 (2007.10)

発表文献

査読有

- () 大容量キャパシタを動力源とするモータアシストAMTのトルクと充放電の制御; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会論文誌 D, (査読中)
- () エンジンとモータの重量を考慮に入れた HEV 車エネルギー効率に関する設計手法; 藤井毅, 電気学会論文誌 D, (投稿準備中)

査読無

- () 大容量キャパシタを用いたモータアシストAMTの駆動力制御; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会産業応用部門自動車研究会 VT-07-04,2007/05
- () 大容量キャパシタを用いた EV の効率的充放電制御の検討; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会産業応用部門自動車研究会 VT-07-20,2008/01
- (V) モータアシストAMTの駆動力制御における路面勾配の影響に対する考察; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会産業応用部門自動車研究会 VT-09-006,2008/01
- () 大容量キャパシタを用いた EV の効率的充放電制御の検討; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会産業応用部門自動車研究会 VT-07-20,2009/01
- () 大容量キャパシタを用いたモータアシストAMTの駆動力と充放電の統合制御; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 電気学会産業応用部門全国大会 2-58,2008/08
- () モータアシストAMT自動車の駆動力制御; 藤井毅 内田利之 堀洋一, 第7回 ITS シンポジウム 2008 1-C-09,2008/12
- () Motor-Assisted AMT System driven by Supercapacitors and Disturbance Observer-based Controller ; Fujii Takeshi, Uchida Toshiyuki, Hori Yoichi, EVS24,2009/05

謝辞

実験車の試作にあたり多大なるご協力をいただいた、東大本郷試作室の内田様、渋谷様、実験車の輸入にあたりご協力いただいたエディテージ椎八重さま、LOVSON Parimal B. Shah様、モータ駆動にあたりご尽力いただいたSONY 石井様、電気二重層キャパシタを提供いただいた日清紡中村様、電気エネルギー貯蔵に関する知識をご指導いただいた電気学会移動体ストレージ調査専門委員会委員各位、電気学会古正さん、その他生研スタッフや掘研メンバの皆様ののおかげで本研究をつつがなく遂行することができました。厚く御礼申し上げます。